ISSN 1014-1219

Gestion des mauvaises herbes pour les pays en développement

Addendum 1

ÉTUDE FAO PRODUCTION VÉGÉTALE ET PROTECTION DES PLANTES

120

Add.1





Gestion des mauvaises herbes pour les pays en développement

Addendum 1

ETUDE FAO
PRODUCTION
VÉGÉTALE
ET PROTECTION
DES PLANTES

120

Add.1

Edité par
R. Labrada

ORGANISATION DES NATIONS UNIS POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE
Rome, 2005

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l' Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

ISBN 92-5-205019-1

Page

Avant-propos

Ce volume est un complément à la publication précédente *Gestion de mauvaises herbes pour les pays en développement* (1994, FAO) d'où le titre *Addendum*, et son objectif est de fournir l'information récente sur les nouveaux développements et les progrès accomplis dans la gestion des mauvaises herbes.

Beaucoup de gens impliqués dans l'agriculture sont de l'opinion selon laquelle la gestion des mauvaises herbes porte uniquement sur l'utilisation des herbicides. Ceci n'est pas vrai, parce qu'en réalité il y a certains problèmes de mauvaises herbes qui pour être résolus ont besoin de l'utilisation de plusieurs stratégies. Le contrôle chimique peut jouer en effet un rôle, mais, certainement, d'autres méthodes existent. Dans le cas des mauvaises herbes aquatiques et parasites, par exemple, on peut constater que les méthodes chimiques peuvent aider, mais elles ne sont pas la seule solution au problème. Aussi, en ce qui concerne le problème actuel du riz sauvage/riz rouge dans le riz cultivé en semis direct, il est clair que les herbicides constituent seulement une partie d'un ensemble de mesures à exécuter.

Cet ouvrage souligne de nouveau l'importance de l'écologie dans la compréhension des problèmes des mauvaises herbes, le besoin d'évaluer les banques de semences dans le sol, l'importance d'évaluer la compétition des mauvaises herbes et la capacité des cultures à établir la compétition avec elles.

Quelques mauvaises herbes embarrassantes et les problèmes qu'elles causent sont aussi décrits. Les plantes envahissantes posent de sérieuses restrictions à l'agriculture dans plusieurs pays à travers le monde. L'une d'elles est *Spathodea campanulata* (le tulipier africain), qui affecte plusieurs domaines de cultures et de forêts dans les Iles du Pacifique. Comme mentionné précédemment, les mauvaises herbes parasites continuent d'être une contrainte sérieuse à la production de légumes comestibles dans le Proche orient et l'Afrique du Nord de même que pour la production de céréales en Afrique au Sud du Sahara. De grands domaines en jachère sont aussi envahis par *Imperata cylindrica*, encore en Afrique au sud du Sahara, pendant que le riz sauvage devient un problème majeur dans les zones où le riz est cultivé en semis direct. Toutes ces questions sont discutées ici et quelques solutions sont proposées sur la base du progrès réalisé jusqu'à présent.

Une attention particulière est accordée à la jacinthe d'eau, qui, selon l'opinion de l'auteur, est la plus prolifique des mauvaises herbes dans les étendues d'eau tropicales et sub-tropicales. La mauvaise herbe est présente dans presque toutes les étendues d'eau en Afrique au sud du Sahara, en Egypte, dans le Sud et le Sud-Est de l'Asie, en Amérique du Nord et dans les Caraïbes. La jacinthe d'eau est un autre exemple qui montre la nécessité de pratiquer la gestion intégrée des mauvaises herbes, où diverses méthodes de contrôle devraient être rationnellement alternées afin d'en réduire le couvert. Bien que le contrôle biologique semble être la méthode de contrôle la plus efficace, il ne peut pas à lui seul réduire l'infestation de cette mauvaise herbe au niveau requis.

Dans le chapitre sur les options de gestion, il y a quelques contributions très intéressantes sur l'usage de diverses méthodes culturales et préventives pour le contrôle des mauvaises herbes, avec un accent particulier sur les plantes de couverture. Les systèmes de labour ont gagné une grande importance, particulièrement le labour zéro et le labour minimum, qui protègent le sol contre l'érosion et conserve l'humidité disponible, mais quelques espèces de mauvaises herbes trouvent un habitat très favorable pour leur croissance quand ces opérations sont pratiquées. D'autres solutions doivent être appliquées là où ces systèmes de labour continuent d'être utilisés.

D'autres stratégies de contrôle sont aussi discutées, dont certaines ne sont pas fréquemment utilisées, comme c'est le cas des cultivars allèlopathiques, qui peuvent réduire avec succès la croissance d'un grand nombre de mauvaises herbes ordinaires, de même que les méthodes pour développer de tels cultivars. Une autre stratégie, largement vulgarisée dans les zones chaudes, sèches, arides et semi arides, est l'utilisation de la solarisation du sol. Ceci est un bon exemple d'utilisation du rayonnement solaire pour les processus agricoles. Dans plusieurs pays cette méthode a remplacé efficacement l'utilisation du bromure de méthyle comme un fumigant du sol.

En visitant le site Web "International Survey of Herbicide-Résistant Crops" (http://www.weedscience.org/in.asp), il peut être observé que jour après jour, nous avons plus de problèmes d'espèces de mauvaises herbes résistantes aux herbicides non seulement dans les nations développées où des herbicides sont couramment utilisés, mais aussi dans les diverses cultures de plusieurs pays en développement où les applications usuelles d'herbicides sont demandées. Ce site révèle qu'il y a 276 biotypes résistants, 166 espèces, (99 dicotylédones et 67 monocotylédones) et plus de 270000 champs affectés par ces mauvaises herbes résistantes. A ce stade il n'y aucune autre option que d'adopter des méthodes spécifiques, premièrement pour prédire et éviter l'évolution de la résistance, et deuxièmement pour fournir des solutions efficaces aux paysans une fois que la résistance s'est développée. Les contributions dans ce volume fournissent ce conseil, lequel évidemment devra être localement validé.

Une autre contribution importante porte sur les avantages et les risques de l'utilisation des cultures résistantes aux herbicides (CRHs). Au lieu d'entretenir une série de polémiques dépourvues de base scientifique, les auteurs de cette section ont engagé une discussion technique en profondeur. Les sujets centraux à aborder en évaluant les risques de CRHs sont expliqués en détail, et les effets contraires sur la gestion de mauvaises herbes et l'environnement par le transfert de gènes d'une population à une autre sont bien illustrés. Le flux de gènes peut favoriser le transfert de gènes de résistance des cultivars résistants aux herbicides (RH) aux cultivars non RH et ainsi polluer une culture qui n'est pas génétiquement modifiée.

Dans le monde, il y a un grand nombre de cas d'espèces de mauvaises herbes exotiques et envahissantes, introduites soit accidentellement ou à dessein, et ce phénomène peut augmenter avec l'intensification du commerce. Les mesures prises pour exclure une espèce de plante, d'où qu'elle vienne, y compris celles qui sont potentiellement envahissantes, doivent être conformes aux normes internationales qui régissent le mouvement des biens de commerce. Le présent volume introduit le thème d'évaluation des risques des mauvaises herbes et donne des directives pour les pays qui souhaiteraient renforcer leurs propres protocoles de quarantaine.

Il faudra noter qu'aucune information n'est fournie ici sur les nouvelles molécules d'herbicide, et ceci parce que les principaux développements des huit dernières années ont eu lieu au moyen de nouvelles technologies et approches. Nous espérons que cet ouvrage soit un autre outil important pour les chercheurs en malherbologie et les vulgarisateurs agricoles dans leurs efforts pour développer de nouvelles méthodes et alternatives de contrôle de mauvaises herbes, et aides paysans dans les pays en développement pour réduire la pénibilité du travail et augmenter en même temps leur productivité.

Ricardo Labrada
FAO, Rome

Liste des collaborateurs

Dr David Chikoye
International Institute of Tropical Agriculture
Ibadan, Nigeria
E-mail: d.chikoye@cgiar.org

Dr Barakat Abu-Irmaileh
Faculty of Agriculture
University of Jordan
Amman, Jordan
E-mail: barakat@agr.ju.edu.jo

Dr Bruce A. Auld
Orange Agricultural Institute
Forest Rd.
Orange 2800, Australia
E-mail: bruce.auld@agric.nsw.gov.au

Dr Paolo Bàrberi
Scuola Superiore Sant'Anna
Classe di Scienze Sperimentali
Settore di Scienze Agrarie
Piazza Martiri della Libertà 33
56127 Pisa, Italy
Fax: +39-050-883.215
E-mail: barberi@sssup.it

Dr Antonio Berti
Weed Management
Centro Studio Biologia e Controllo
Piante Infestanti - CNR
Agripolis, 35020 Legnaro
Padova, Italy
Email: antonio.berti@unipd.it

Dr John Cardina
Horticulture and Crop Science
Ohio State University
Wooster
OH 44691
United States of America
E-mail: cardina.2@osu.edu

Mr Abuelgasim Elzein
Institut of Plante Production and Agroecology in the Tropics and Subtropics
University of Hohenheim (380)
70593 Stuttgart Germayn
E-mail: gasim@uni-hohenheim.de

Dr Aldo Ferrero
Dipartimento di Agronomia,
Selvicoltura e Gestione del Territorio
Università degli Studi di Torino
Via L. da Vinci, 44
10095 Grugliasco (To), Italy
E-mail: aldo.ferrero@unito.it

Dr Frank Forcella
USDA-ARS
Morris
MN 56267
United States of America
E-mail: forcella@morris.ars.usda.gov

Professor Kil-Ung Kim
Department of Agronomy
College of Agriculture
and Life Sciences
Kyungpook National University,
Daegu 702-701
Republic of Korea
E-mail: kukim@knu.ac.kr

Dr Jürgen Kroschel
Institute of Plante Production & Agroecology
in the Tropics and Subtropics,
University of Hohenheim (380)
70593 Stuttgart, Germany
E-mail: kroschel@uni-hohenheim.de

Dr Ricardo Labrada
Weed Officer
Plante Protection Service
Plante Production and Protection Division
Food and Agriculture Organization of the United Nations
Viale della Terme di Caracalla
00100 Rome, Italy
E-mail: Ricardo.Labrada@FAO.org

Dr Maricela Martínez Jiménez
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental,
Paseo Cuaunháhuac 8532, Progreso Jiutepec
Morelos, México
E-mail: mmartine@tlaloc.imta.mx

Dr Kathrine Hauge Madsen
Centre for Bioethics and Risk Assessment
40 Thorvaldsensvej
DK-1871 Frederiksberg C, Denmark.
Phone: +45 35 28 34 57
E-mail: khm@kvl.dk

Ms Mereseini Nagatalevu-Seniloli
Ministry of Agriculture, Fisheries & Forests
Koronivia Research Station
Viti Levu, Fiji
Present address:
Pacific Foundation for the
Advancement of Women
P.O. Box 3940
Samabula, Fiji

Dr Maurizio Sattin
Senior Researcher
Weed Management
Centro Studio Biologia e Controllo
Piante Infestanti - CNR
Agripolis
35020 Legnaro,
Padova, Italy
E-mail: sattin@pdadr1.pd.cnr.it

Dr Dong-Hyun Shin
Department of Agronomy
College of Agriculture
and Life Sciences
Kyungpook National University,
Daegu 702-701
Republic of Korea

Dr Jens Carl Streibig
The Royal Veterinary and
Agricultural University
Department of Agricultural Sciences
Weed Science
Agrovej 10 DK-2630 Taastrup, Denmark
E-mail: Jens.C.Streibig@agsci.kvl.dk

Dr John R. Teasdale
USDA-ARS
Sustainable Agricultural Systems
Laboratory
Building 001 Room 245
Beltsville
Maryland 20705
United States of America
E-mail: teasdale@ba.ars.usda.gov

Dr Bernal E Valverde
The Royal Veterinary and
Agricultural University
Department of Agricultural Sciences
Agrovej 10
DK-2630 Taastrup, Denmark
E-mail: bev@kvl.dk

Dr Theodore Webster
USDA-ARS
Tifton
GA 31794, United States of America
E-mail: twebster@tifton.cpes.peachnet.edu

Dr. Peter A.Williams
Bag 6, Nelson Landcare Research
Private, New Zealand.
Email: WilliamsP@Landcare.cri.nz

Dr Carlos Zaragoza
Unidad de Sanidad Vegetal
Servicio de Investigación Agroalimentaria
Gobierno de Aragón
Ctra. de Montañana 930
Zaragoza, Spain
E-mail: carza@aragob.es

Chapitre 1

Techniques de recherche et d'évaluation des risques pour une gestion améliorée des mauvaises herbes

Protocoles pour la détermination de banque de semences de mauvaises herbes dans l'agro-écosystème

Frank Forcella, Theodore Webster et John Cardina

INTRODUCTION

Un nombre de raisons existent pour l'étude de banque de semences de mauvaises herbes. Mayor et Dessaint (1998, pp. 95-96) ont probablement mieux résumé celles-ci pour des buts agronomiques dans la déclaration suivante:

- Les banques de semences ont une importance écologique et évolutionniste dans la dynamique des populations et communautés de mauvaises herbes.
- La longévité et la persistance dans le sol de semences viables des années précédentes peuvent jouer un rôle tampon vi as vis des méthodes de contrôle et maintenir par conséquent le problème de mauvaises herbes. Quelques chercheurs ont trouvé que, à l'exception de mauvaises herbes à grosse graines, la banque de semences plutôt que la végétation est un meilleur indicateur des influences à long terme des pratiques agronomiques sur les mauvaises herbes.

Les banques de semences sont aussi étudiées dans le but d'anticiper sur les problèmes de mauvaises herbes, d'évaluer la biodiversité et les ressources alimentaires des granivores, etc. Bien que les buts des études de banque de semences puissent être tout à fait divers, un dénominateur commun aux chercheurs de banque de semences est leur intérêt pour un échantillonnage adéquat. En effet, les nouveaux chercheurs dans ce domaine expriment souvent leur inquiétude en ce qui concerne les méthodologies pour l'échantillonnage et la quantification de banques de semences. Le but de ce chapitre est de fournir quelques directives en ce qui concerne les protocoles d'échantillonnage pour l'estimation des banques de semences de mauvaises herbes dans le sol.

Le récent volume de symposium édité par Champion *et al.* (1998) fournit une des meilleures condensations disponibles d'études de banque de semences et de méthodologies. Nous encourageons les chercheurs qui désirent commencer le travail sur les banques de semences à consulter ce livre. Un autre traité très utile sur les banques de semences est celui de Leck *et al.* (1989). La revue par Roberts (1981) et les chapitres dans Baskin et Baskin (1998) contiennent aussi beaucoup d'informations utiles. Sinon, la première et la plus importante directive que nous pouvons fournir est que les objectifs de toute l'expérimentation devaient être harmonisés avec le besoin d'avoir l'information sur les banques de semences. Est-ce que la connaissance de la composition et de la densité des banques de semences fourniront des indications qui sont plus utiles que celles de la connaissance de la végétation? Bien que les analyses de banque de semences ne sont pas d'habitude très chères, elles nécessitent une main-d'œuvre abondante. Par conséquent, les objectifs des études de banques de semences devraient être clairs et sans équivoque. Les chercheurs doivent se rappeler que la banque de semences fait partie d'un système dynamique sol-plante-animal-microbe, et le travail pénible de la caractérisation de la banque de semences nous fournit seulement une vue instantanée dans le temps.

La seconde directive la plus importante que nous pouvons fournir est qu'il n'y a pas de protocole d'échantillonnage universel applicable à toutes les études de banques de semences de sol. Chaque investigateur a des objectifs spécifiques et des limitations uniques sur le plan de la main-d'œuvre et de l'équipement. De plus, chaque agro-écosystème devant être étudié a aussi des caractéristiques qui peuvent exiger des protocoles expérimentaux spécifiques. Les protocoles uniques sont plus évidents pour les systèmes agricoles avec des mauvaises herbes spécifiques:par

exemple rares – par opposition à espèces communes, petites - par opposition à semences de grande taille, et largement dispersée - par opposition à espèce localisée en agrégats. Cependant, l'environnement physique joue aussi un grand rôle dans l'efficacité de l'échantillonnage et des protocoles. Par exemple, les sols argileux humides sont beaucoup plus difficiles à échantillonner que les sols limoneux humides. Ces différences doivent être prises en compte en concevant les protocoles pratiques pour l'évaluation des banques de semences des mauvaises herbes.

Les chercheurs qui s'intéressent aux banques de semences doivent concevoir des protocoles qui conviennent à leurs objectifs, leurs contraintes en équipement et en main-d'œuvre, et au système agricole dans lequel ils travaillent. Par conséquent, nos buts dans ce rapport sont de fournir des indications qui peuvent aider les chercheurs, surtout ceux qui sont novices dans le domaine des analyses de banque de semences à concevoir de nouvelles études sur les banques de semences de mauvaises herbes avec un minimum d'effort consacré au développement de protocoles. Cela ne signifie que de nouveaux protocoles plus efficaces ne devraient pas être conçus. Plutôt, nous exhortons les chercheurs en banques de semences à ne pas recopier et répéter des protocoles faibles qui auraient pu être plus efficaces seulement avec des modifications insignifiantes. Ces modifications n'exigent souvent aucune main-d'œuvre ou dépense supplémentaire. Dans certains cas, seul le temps ou le type d'échantillonnage devraient être modifiés.

ECHANTILLONNAGE DE SOLS AU CHAMP

Les banques de semence sont typiquement confinées à la surface et dans les trente premiers centimètres du sol, bien que quelques plantes pérennes maintiennent des semences dans des banques de semences de surface (par exemple dans les cônes de *Pinus contorta* Douglas ex-Loudon). C'est pourquoi, l'échantillonnage de sols est d'habitude une composante nécessaire dans les études de banque de semences. Les questions les plus évidentes qui se posent sont: combien et quelle taille d'échantillons de sol devraient être pris?

La distribution horizontale de semences à travers le sol détermine, partiellement, combien d'échantillons de sol doivent être prélevés. Les semences des mauvaises herbes ne sont pas distribuées au hasard dans un champ. S'il en était ainsi, l'échantillonnage des banques de semences serait beaucoup plus facile. Au contraire, les banques de semences de mauvaises herbes sont presque toujours extrêmement localisées en agrégats dans les champs (Wiles et Schweizer, 1999, Chauvel *et al.* 1989). Le rassemblement en agrégats peut être le résultat d'une dispersion très limitée non loin des plantes mères, tel que c'est le cas pour les mauvaises herbes précoces dans les cultures à cycle long (par exemple *Avena fatua* L. dans le soja); ou la dispersion par l'homme de mauvaises herbes qui arrivent à maturité en même temps que les cultures, de sorte que les semences sont dispersées en bandes dans les champs par les moissonneuses batteuses (par exemple, *A. fatua* dans le blé). Un tel regroupement des semences affecte les résultats d'échantillonnage de banques de semences de sol.

La répartition spatiale des banques de semences peut être souvent décrite mathématiquement par une distribution binomiale négative (DBN). D'un point de vue pratique, cela signifie fondamentalement que beaucoup d'échantillons de sol représentatifs de la banque de semences pour une espèce donnée n'auront aucune semence, et petit nombre d'échantillons auront des nombres élevés de semences. Par exemple, Jones, (1998) a trouvé qu'au moins la moitié de ses échantillons de sol était dépourvue de semences quand les densités moyennes de semences étaient moins de 4000 m^{-2}, et que 75 % des carottes étaient dépourvues de semences quand les densités de semences étaient moins de 750 m^{-2}. Il faut noter que la densité de semences change le niveau apparent d'agrégation. Il est typique de notre que lorsque la densité d'une espèce augmente, le niveau de regroupement diminue, et la facilité d'échantillonnage adéquat augmente, mais ce constat général comporte beaucoup de variations. Par exemple, dans l'équation de la DBN, le niveau d'agrégation est associé au coefficient k, rapporté par Chauvel *et al.* (1989) pour plusieurs espèces de mauvaises herbes courantes des régions tempérées (Table 1).

Tableau 1. Des statistiques descriptives pour la distribution de semences de cinq des espèces les plus abondantes dans un champ en France, où N est le nombre total de semences détectées dans les échantillons de sol (4,7 cm de diamètre et 30 cm de profondeur), *m* est le nombre moyen de semences par échantillon, CV est le coefficient de variation (*s/m*), et *k* est le coefficient d'agrégation de la DBN.

Espèces	*N*	*m*	CV	*k*
Thlaspi arvense L.	1105	5.58	0.72	2.79
Sinapis arvensis L.	1079	5.45	1.01	1.20
Chenopodium album L.	881	4.45	0.96	1.42
Alopecurus myosuroides Huds.	527	2.66	1.31	0.75
Fallopia convolvulus (L.) Loeve	409	2.07	0.83	4.76

L'espèce la plus courante (plus grande valeur de *m*) dans le Tableau 1 était *T. arvense*, qui avait le CV le plus bas et une des valeurs de *k* les plus élevées, ce qui signifie qu'elle n'était pas aussi agrégée que la plupart des autres espèces. L'espèce la moins courante était *F. convolvulus*, qui aurait pu être la plus agrégée, mais dans cet exemple elle était la moins agrégée (valeur de k la plus élevée). *A. myosuroides* était l'espèce la plus agrégée (k était le plus bas), et son CV était le plus élevé et *m* presque le plus bas de toutes les espèces. Ces résultats suggèrent que l'espèce la plus difficile à détecter dans ce champ particulier serait *A. myosuroides*. Néanmoins, avec le nombre et la taille appropriés d'échantillons, même la densité de *A. myosuroides* a pu être établie avec quelque certitude.

Quelle quantité de sol échantillonner?

La question initiale à laquelle il faut répondre est : "quelle quantité de sol ai-je besoin d'échantillonner pour obtenir une représentation précise de la banque de semences?" La quantité de sol échantillonné est un produit du nombre et de la taille des carottes. La taille de la carotte est fonction de sa surface ou de son diamètre (la plupart des outils d'échantillonnage de sol sont des tubes avec des orifices circulaires) et de sa profondeur.

Combien d'échantillons de sol?

L'absence d'une distribution aléatoire des populations de semences dans le sol pose des problèmes pour l'échantillonnage des banques de semences. La première question est de savoir combien de carottes de sol devraient être échantillonnées pour une représentation suffisante d'une banque de semences. Un des meilleurs articles récemment publiés sur cette question est la synthèse d'une étude conduite dans plusieurs états et sur plusieurs années, subventionnée par la Société Européenne de malherbologie (Dessaint *et al.* 1996).

Des données empiriques de densités de banques de semences de cinq pays a montré ont abondamment mis en évidence une relation consistante entre la densité moyenne de banque de semences et la variance. En général, la relation est du type $\log_{10} s^2 = 0.45 + 1.41 \log_{10} m$, qui est une adaptation de la Loi de Taylor. De cette relation, Dessaint et *al.* (1996) ont déduit une équation qui aide à se faire une idée approximative de la précision de l 'échantillonnage sur la base de différents niveaux de précision voulue. Cette équation est

$$N = 10^{0.45} (m/509)^{-0.59} D^{-2} \qquad [1]$$

Où N est l'estimation du nombre d'échantillons nécessaires (carottes de sol de 5 cm de diamètre) pour une représentativité suffisante d'une banque de semences, et D représente le niveau de précision voulu. D est défini comme l'erreur standard de la moyenne divisée par la moyenne (SE_m / m). La valeur de m est divisée par 509 pour convertir l'aire d'une carotte de 5 cm de diamètre à 1 m^2. Dessaint *et al.* (1996) ont indiqué qu'une valeur de D de 0,3 était un niveau pratique de précision pour les études de banques de semences. Nous pensons que même une valeur de 0,5, qui est moins précise que 0,3, peut être suffisante selon les objectifs des chercheurs. Par exemple, peut-être D pourrait être pris entre 0,4 et 0,5 pour des espèces qui sont relativement rares mais facilement contrôlées. Par contre, des valeurs de D comprises entre 0,2 et 0,3 conviennent pour les espèces qui sont fréquentes et difficiles à gérer. Ainsi, les efforts d'échantillonnage sont conditionnés par la qualité exigée de l'information qui en résulte.

La tableau 2 représente les solutions de l'équation 1 pour des densités de semences supposées de 10, 50, 100, 500, 1000, 5 000, et 10 000 semences par m^2, chacun à un niveau de précision de 0,2, 0,3, 0,4, et 0,5. Ces résultats de Dessaint *et al.* (1996) sont issus de l'utilisation de carottes de sol de 5 cm de diamètre. Les résultats seraient différents pour d'autres diamètres de carottes de sol de: des nombres plus élevés d'échantillons pour des carottes de plus petit diamètre, et moins d'échantillons pour les plus grands carottes plus grandes. Cependant, comme ci- dessous souligné des de 5 cm de diamètre est une taille idéale de carotte pour les études de banques de semences, et nous recommandons l'usage d'un tarière de cette taille comme outil d'échantillonnage de sol.

Table 2. Le tableau 2. Le nombre de carottes de sol (5 cm de diamètre) nécessaires pour déterminer les densités de banque de semences pour quatre niveaux de précision en supposant diverses densités de semences.

banque de semence (semences m^{-2})	------------------------ Niveau de Précision (*D*)---------------------			
	0.2	**0.3**	**0.4**	**0.5**
10	716	318	179	115
50	277	123	69	44
100	184	82	46	29
500	71	32	18	11
1000	47	21	12	8
5000	18	8	5	3
10000	12	5	3	2

Les résultats du Tableau 2 (Dessaint *et al.* 1996) pourraient être spécifiques à la région dans laquelle les données ont été collectées, mais cette région était assez large, avec plusieurs cultures et types de sol et, couvre les frontières de plusieurs nations, et s'étend des agro écosystèmes méditerranéens aux agro écosystèmes tempérés. Dans tous les cas, le nombre de carottes de sols nécessaires pour estimer les densités de banque de semences n'est pas aussi grand que l'indiquent d'autres sources de littératures, pourvu que les densités de l'espèce considérée soient supérieures à 100 semences m^{-2}. Ces résultats pourraient connaître une application universelle (bien que l'on puisse certainement prédire des exceptions), qui aidera à alléger le lourd fardeau qui pèse sur les chercheurs dans le domaine des banques de semences. Cependant, il faudrait garder à l'esprit, que si le but de l'étude est de caractériser complètement la flore et la densité de semences, comme c'est le cas dans une analyse de communauté de mauvaises herbes, alors le nombre de carottes exigé est plus élevé parce que l'espèce la moins fréquente sera échantillonnée à un niveau de précision plus bas que l'espèce la plus fréquente. Dans les champs, plus de 90 % des semences, pourraient juste provenir de quelques unes des 30 ou plus espèces représentées dans la banque de semences. Par conséquent, quelques uns des changements les plus intéressants dans les communautés de mauvaises herbes -tels que l'inversion de la flore en réponse aux pratiques de gestion - pourraient se produire au niveau des espèces les moins abondantes, et plus forte intensité d' échantillonnage est nécessaire pour détecter ces changements.

Bien que les banques de semences varient beaucoup en densité, la valeur médiane pour les champs de cultures dans le Minnesota est d'environ 1000 semences m^{-2} (Forcella *et al.* 1993). Selon le Tableau 2 l'estimation de cette densité exigerait 21 échantillons pour le niveau de précision recommandé de 0,3. En clair, des espèces de très faibles densités (<100 semences m^{-2}) exigeraient si tant d'échantillons de carottes de sol qu'une détermination précise de leurs banques de semences n'est pas pratique. Un exemple d'une telle espèce est *Xanthium strumarium* L. Ses semences sont produites dans des capsules de deux graines, dont la taille est environ 1 x 2 cm. Peu de ces grosses semences sont comparativement aux autres mauvaises herbes dont les semences sont plus petites. Par conséquent, la détection de *X. strumarium* dans les banques de semences est rare, sauf dans des infestations très denses, si bien qu'une estimation précise de la taille de sa banque de semences est assez difficile. En dépit de son importance comme mauvaise herbe et la volonté des chercheurs pour comprendre la dynamique de sa banque de semences, une telle espèce à grosses graines ne se prête pas facilement à l'analyse de banque de semences.

Quelle taille pour l'échantillon de sol?

Le diamètre de la carotte de sol dépend d'habitude de l'équipement disponible. La plupart des équipements manuels d'échantillonnage de sol furent mis au point pour les chercheurs en pédologie, et beaucoup d'entre eux ont environ 2-3 cm de diamètre. Bien que, théoriquement, n'importe quel diamètre de carotte de sol convient pour l'échantillonnage des banques de semences de mauvaises herbes, certaines tailles sont de loin plus pratiques que d'autres.

Comme mentionné ci-dessus, moins de carottes de terre de grand diamètre que de carottes de sol de petit diamètre sont nécessaires pour un échantillonnage approprié des banques de semences. Cependant, des carottes de grand diamètre amassent rapidement de grandes quantités de sol et peuvent accabler le chercheur. Par exemple, une seule carotte de sol de 10cm de diamètre (15 cm de profondeur) a un poids sec d'environ 1à 2 kg. Théoriquement, même si seulement dix carottes ont été prélevées par parcelle, le poids total (sol plus l'eau du sol) de l'échantillon pourrait être 20 kg. Si une expérimentation a dix traitements et cinq répétitions, la masse totale de sol échantillonnée pourrait être de 1 000 kg. De telles quantités de sol peuvent être encombrantes pour le transport du ou vers le champ, de même que dans le laboratoire.

Par contre, le sol dans petites carottes (par exemple 2 cm de diamètre) pourrait peser seulement 50-100 g, ce qui les rend facile à manipuler et à transporter. Cependant, la probabilité de détecter des semences dans de telles petites quantités de sol est si faible, que beaucoup de carottes doivent être échantillonnés en compensation. Il y a très peu d'études qui comparent les tailles de carottes pour l'efficacité de l'échantillonnage. Benoît *et al.* (1989) ont trouvé que des tarières de 1,9, 2,7, et 3 ,3 cm de diamètres n'étaient pas différentes dans l'estimation du nombre de semences de *Chenopodium album,* quand un même volume similaire de sol a été échantillonné. Bien que le plus grand et le plus petit de ces diamètres diffèrent seulement par un facteur de 1,7, les plus grands et plus petits volumes de sol échantillonnés d'un seule carotte prélevé par ces tarières diffèrent par un facteur de 3. En d'autres termes, trois fois plus de carottes de sol de 1,9 cm de diamètre devraient être échantillonnées comparativement aux carottes de 3,3 cm de diamètre afin d'estimer les mêmes densités de banques de semences. La main-d'œuvre supplémentaire impliquée dans le prélèvement de plus de carottes ne peut pas compenser la facilité d'utilisation des carottes de petit-diamètre.

Notre expérience est que des carottes de sol de 5 cm de diamètre représentent une solution pratique au problème de taille de carotte. Cette taille de carotte est assez grande pour détecter les semences, et assez petite pour ne pas encombrer le chercheur avec trop de sol. Nous recommandons leur utilisation dans des études de banque de semences.

Cependant, d'autres facteurs interviennent aussi dans le choix des diamètres des outils de prélèvement de carottes de sol. Le plus important de ceux-ci sont la texture et la teneur en eau du sol. Les sols humides, avec de forts pourcentages d'argiles gonflantes sont notoirement difficiles à enlever des tubes d'échantillonnage, surtout des tubes à petit diamètre. Des carottes ayant jusqu'à 10 cm de diamètre jusqu'à devraient être considérés pour de tels sols. L'application des huiles non-toxiques (huiles végétales) à l'instrument de prélèvement des carottes peut de beaucoup aider à empêcher l'argile de se coller à l'instrument. Les orifices qui sont de quelques millimètres plus étroits que le diamètre du tube d'échantillonnage peuvent aider aussi à empêcher le sol d'adhérer trop fortement à l'intérieur du tube d'échantillonnage. Cependant, ces types d'outils de prélèvement de carottes de sol sont plus enclins à compacter les sols à faible densité pendant que l'outil de prélèvement s'enfonce dans le sol. Cette compaction de la carotte porte préjudice à la fiabilité de la profondeur de la carotte. Par opposition, un sol très sec peut résister à la pénétration des instruments de prélèvement. Dans ces cas, des carottes de petite taille peuvent être plus pratiques que les carottes de 5 cm de diamètre recommandées. Les chercheurs doivent être pratiques et tenir compte de plusieurs facteurs en choisissant l'équipement d'échantillonnage.

Des véhicules équipés de sondes de sol sont disponibles et très utiles pour l'échantillonnage de grandes parcelles et de grands champs. Des systèmes hydrauliques enfoncent les sondes dans le sol, les retirent, enlèvent le sol des sondes, ce qui facilite énormément l'échantillonnage dans diverses conditions. Cependant un équipement monté sur un véhicule ne convient pas sur de petites parcelles de recherche. Un équipement manuel est souvent plus facile à utiliser dans ces cas.

Quelle profondeur de sol échantillonner?

La profondeur à laquelle les carottes de sol devraient être prises dépend entièrement des objectifs de la recherche. Généralement, peu de jeunes plantules ont la capacité d'émerger si leurs semences sont enterrées à plus de 10 cm de profondeur. Les exceptions concernent les espèces à grosses semences telles que *A. fatua* et *X. strumarium*. Par conséquent, il est rarement nécessaire que les échantillonnages de sol dépassent 10 cm de profondeur. Cependant, beaucoup de chercheurs sont intéressés par différents systèmes de labour dans lesquels les semences sont enterrées à différentes profondeurs par les instruments de labour. Dans ces cas, des échantillons à 30 cm de profondeur peuvent être nécessaires. Cependant, ces chercheurs devraient se rappeler, que l'enterrement de semences par l'équipement de labour mécanique est un procédé physique qui se produit de façon régulière (voir ci-dessous). En d'autres termes, le même type de labour enterre les semences dans les mêmes proportions et aux mêmes profondeurs indépendamment du type de sol, de la localité, de la période de l'année, etc. Cette régularité signifie que si le système de labour est connu, alors les proportions relatives de semences aux différentes profondeurs peuvent être estimées sans jamais échantillonner la banque de semences. Par conséquent, une seule profondeur peut être échantillonnée pour estimer la banque de semences dans tout le profil du sol, et cette profondeur devrait être probablement une fonction des caractéristiques de profondeur d'émergence de l'espèce qui préoccupe le chercheur.

Quelle distribution spatiale des échantillons?

Pour l'échantillonnage des sols sur une parcelle ou dans un champ entier, les chercheurs doivent décider de la distribution spatiale des échantillons. Les modèles d'échantillonnage aléatoire conviendraient si les semences étaient distribuées au hasard. De plus, le temps que l'on passe à localiser les points d'échantillonnage aléatoire dans un champ, sur la base de nombres aléatoires sélectionnés *à priori*, cette méthode n'est souvent pas pratique. Pour la facilité de l'échantillonnage, beaucoup de chercheurs prélèvent des carottes de sol à des intervalles à peu près réguliers sur un simple parcours en forme de W dans une parcelle ou dans un champ. D'autres ont utilisé des parcours en forme de X ou un simple transect sur la diagonale. Colbach

et al. (2000) ont étudié divers types de parcours pour l'échantillonnage de populations agrégées de mauvaises herbes et ont conclu que plusieurs parcours aboutissent aux mêmes résultats, le transect sur la diagonale le dispositif le plus simple. Nous recommandons d'utiliser n'importe quel dispositif d'échantillonnage pourvu qu'il couvre la longueur et la largeur de la parcelle ou du champ.

Quand échantillonner les banques de semences?

Point n'est besoin d'insister sur la nécessité d'être logique lorsqu'on décide de la période appropriée pour l'échantillonnage des banques de semences. Plusieurs auteurs rapportent un manque de correspondance entre la végétation de surface, la composition de la banque de semences et la densité. L'absence d'une telle correspondance reflète bien souvent les périodes illogiques que ces auteurs choisissent pour échantillonner la banque de semences. Pour le bien de la camaraderie nous ne citerons pas de référence à cet égard, mais même une lecture occasionnelle des sections de Méthodes et Matériels de la littérature de banque de semences confirmera notre assertion.

Fondamentalement, si le but de la recherche est d'étudier la correspondance entre les banques de semences à la prochaine végétation, alors les banques de semences devraient être échantillonnées à des périodes qui suivent la production de semences mais précèdent la germination. Echantillonner des banques de semence après l'émergence des plantules a peu de valeur, en théorie comme dans la pratique. Des échantillons doivent être pris à un moment qui soit logique par rapport aux objectifs de l'étude, sur la base de la phénologie de la dispersion et de la germination des semences dans l'habitat concerné. Ainsi, dans les zones tempérées, les banques de semences de mauvaises herbes annuelles d'été devraient être échantillonnées avant la première vague d'émergence des plantules au printemps. De même, des banques de semences de plantes annuelles d'hiver devraient être échantillonnées avant l'apparition des premières plantules en automne. Une logique analogue devrait être utilisée pour les périodes d'échantillonnage dans les zones semi-tropicales et tropicales saisons pluvieuses et sèches distinctes. Le même raisonnement devrait s'appliquer aux terres irriguées sans tenir compte de la saison; c'est-à-dire les sols devraient être échantillonnés avant le début de l'irrigation et la germination subséquente des semences de mauvaises herbes.

Même quand les échantillons de sol sont pris avant la germination des semences, la question du moment d'échantillonnage peut toujours se poser. Par exemple, au Nord des zones tempérées , les semences de beaucoup de mauvaises herbes annuelles d'été sont produites d'août à octobre et germent dans la période qui suit de mars à juin, le moment exact dépendant de l'espèce. La période de temps pour échantillonner convenablement les banques de semence de ces espèces serait tard en automne jusqu'au début du printemps (par exemple de novembre à mars). Même pendant l'hiver, une période de quiescence apparente, il y a cependant de l'activité biologique en ce qui concerne les semences enterrées. Cette activité affecte la mortalité des semences, et elle peut influencer les moments les plus propices pour l'échantillonnage de banques de semences.

Des comparaisons de banques de semences viables de mauvaises herbes annuelles d'été à partir de deux périodes d'échantillonnage (immédiatement après la production des semences en automne et immédiatement avant la germination des semences au printemps) ont indiqué une perte approximative de 10 % de viabilité au cours de l'hiver et une légère supériorité des échantillons du printemps pour la prédiction des densités de mauvaises herbes dans la végétation subséquente (Forcella, 1992). Théoriquement, ceci est exactement ce qu'on prédirait. La végétation des mauvaises herbes annuelles devrait refléter la banque de semences immédiatement avant germination, mieux que la banque de semences déterminée plusieurs mois avant parce que plusieurs événements de mortalité pourraient intervenir dans la période.

Bien que la théorie de l'échantillonnage de banque de semences indique qu'il faut faire l'échantillonnage immédiatement avant la germination des semences, des considérations pratiques en matière de recherche sur les banques de semences peuvent justifier un échantillonnage précoce (mais toujours , après la production de semences). Les chercheurs ont besoin de mettre en harmonie la précision désirée avec la charge de travail. Dans l'exemple ci-dessus, le printemps est non seulement le meilleur temps pour échantillonner des sols, mais il est la seule période pour semer les cultures et appliquer la plupart de procédures de contrôle des mauvaises herbes. Par conséquent, peu de temps existe au printemps pour le surcroît de travail qu'exige l'échantillonnage des banques de semence. Pour cette seule raison l'échantillonnage précoce des banques de semences peut être justifié, si ce n'est en association avec d'autres raisons. Les chercheurs doivent souvent mettre en harmonie de bons protocoles avec les contraintes de main-d'œuvre qu'ils imposent.

Une raison supplémentaire pour l'échantillonnage précoce est le temps nécessaire pour traiter des échantillons de sol au laboratoire ou dans la serre (voir ci-dessous). Si le but de la recherche est d'utiliser l'information sur les banques de semences pour aider à formuler des recommandations pour des traitements de gestion des mauvaises herbes (Schweizer *et al.* 1997) alors l'information doit être disponible au moment où les traitements doivent être appliqués. Ceci pourrait être le plus tôt que possible, des jours ou même des semaines avant que les parcelles d'expérimentation ne soient semées dans le cas des traitements herbicides précoces de pré plantation. Par conséquent, l'échantillonnage de sols des mois avant le semis peut être nécessaire.

COMMENT DEVRAIT ON TRAITER LES CAROTTES DE SOL?

Une fois que les carottes de sol ont été prélevés du sol, il y a deux techniques primaires pour déterminer le nombre de semences qu'elles contiennent. Les deux méthodes donnent des résultats différents, mais il y a une corrélation entre ces deux résultats (Ball et Miller 1989, Barberi *et al.* 1998, Cardina et Sparrow, 1996; Forcella 1992).

Extraction directe de semences

La première technique peut être baptisée " extraction directe de semences", et Malone, (1967) est l'auteur le plus souvent cité pour cette technique. La méthode d'extraction directe de semences peut être utilisée sur : (a) l'échantillon de sol entier issu des carottes entières individuelles, (b) sous-échantillons de carottes individuelles, ou (c) sous-échantillons de sol de carottes regroupées. En clair, des exigences de main-d'œuvre diminuent de (a) à (c), de même que la fiabilité des estimations de densités de banque de semences qui en résultent.

Une carotte typique de sol de 5 cm de diamètre et 10 cm de profondeur a un poids sec d'environ 200-300 g. Naturellement, si la main-d'ocuvre disponible n'est pas limitée, l'extraction de semences de la carotte entière de sol est préférable. Cependant, un manque de main-d'ocuvre (ou l'enthousiasme associé) est courant dans les études de banque de semences. Ainsi, une certaine compréhension de quelle proportion d'une carotte de sol devant être examinée est importante. Des analyses de différentes quantités de sol bien mélangé issues de carottes types et augmentant graduellement de 20 g indiquent que, en général, 100 g de sol sont nécessaires pour une représentativité adéquate de la carotte entière de sol (Forcella, 1992).

Le sous-échantillonnage à partir de carottes regroupées pourraient être souvent recommandé dans les études où les carottes individuelles sont petites (moins de 5 cm de diamètre), mais lorsque beaucoup de carottes ont été prélevées. Examiner tout le volume de sol de chaque carotte de petit diamètre serait inutile parce que la probabilité pour qu'une petite carotte contienne même une seule semence est très faible (Benoît *et al.* 1989; Jones, 1998).

Dans la technique d'extraction directe de semences, les semences sont séparées du sol par lavage ou flottation. La méthode de lavage a plusieurs variantes. Plus simplement, l'échantillon de sol est placé sur un tamis dont la maille est plus petite que la plus petite semence que l'on espère. Cependant, le tamisage comporte le risque de la perte des semences de même taille que les débris ou qui adhèrent aux débris qui sont séparés par le tamis. Le tamisage - surtout pour les échantillons secs - peut endommager des semences qui sont fines, légères, et fragiles, mais il peut aider à scarifier les semences aux téguments durs. Plusieurs chercheurs ont utilisé une série de tamis avec des mailles de tailles différentes pour répartir les semences selon leur taille. La taille de la maille est un facteur critique qui détermine l'efficacité de la séparation des semences. Une maille d'environ 0,2 mm peut retenir la plupart des petites semences, mais ne serait pas efficace pour les semences sous forme de poussière comme c'est le cas des espèces du genre *Orobanche* (voir ci-dessous). Il peut aussi y avoir une variation considérable dans la taille des semences d'une espèce donnée, même d'une même plante. Donc, la taille de maille choisie pour détecter des semences d'une espèce donnée doit être assez petite pour retenir les plus petits individus de cette espèce.

L'échantillon peut être trempé pour un laps de temps pour saturer et ramollir les mottes d'argile. Le trempage de l'échantillon de sol dans une solution de hexametaphosphate de sodium améliorera la dispersion des mottes d'argile. L'étape suivante est d'enlever l'argile, le limon, et les fines particules de sable de l'échantillon. Ceci est ordinairement fait en secouant l'échantillon pendant qu'il est dans le tamis, ou en passant un jet d'eau sur l'échantillon. Une fois que les fines particules ont passé à travers le tamis, le reste de l'échantillon comprend les semences, les débris organiques, les particules de sable, et dans les sols riches en argile, les mottes d'argile qui ne se sont pas entièrement dispersées. Ces dernières mottes d'argile peuvent souvent être éliminés en appliquant une légère pression du bout des doigts jusqu'à ce que les mottes s'effritentent et passent à travers le tamis. Les semences et les débris organiques qui restent sur dans le tamis sont séparés des particules de sable par flottation différentielle (voir ci-dessous). Si les particules de sable ne sont pas nombreuses, l'échantillon peut être transféré sur toile à maille (par exemple, mousseline à fromage) séché à l'air, après quoi les semences sont séparées des débris organiques à la main. Les nettoyeurs de semence par conduits d'air peuvent être aussi utilisés pour séparer les débris organiques des semences dans des échantillons séchés.

Un décanteur est un appareil qui exécute mécaniquement les mêmes procédures comme décrit dans le paragraphe précédant (Gross et Renner, 1989). L'avantage des décanteurs est qu'ils peuvent traiter plusieurs échantillons simultanément. L'équivalent d'une machine primitive à laver le linge, mais motorisée, a été utilisée avec succès par Fay (1978) pour enlever le sol d'échantillons de semences enterrées. Ces machines conviennent, mais ne sont pas indispensables pour des analyses de banques de semences.

La méthode de flottation est souvent utilisée après que l'échantillon de sol ait été lavé et libéré d'argile, de limon, et de sables fins, mais des échantillons non encore traités peuvent être aussi utilisés. Le but, ici, est d'affecter d'une manière différentielle la flottabilité des semences et des particules de sol Différents sels peuvent être utilisés à cette fin. Le carbonate de potassium a prouvé son utilité dans cette tentative, en ce qu'il permet la séparation des semences des particules de sol. L'exposition courte au carbonate de potassium n'est pas toxique pour les semences de quelques espèces (Buhler et Maxwell, 1993), mais il peut létal sur autres (Luschei et al.1998). Quelque débris organiques flotte avec les semences. Si des grands tubes sont utilisés pour les échantillons et la solution de carbonate de potassium, ceux-ci peuvent être centrifugés pour faciliter la séparation des semences des particules de sol (Buhler et Maxwell, (1993). Cette méthode est plus utile si on s'intéresse à une seule espèce, et les concentrations de détergent et de sel qui sont efficaces, mais pas toxiques, peuvent être déterminées. Toutes les méthodes d'extraction directe de semences donnent des estimations de densités totales de banques de semences, y compris les densités de semences mortes (voir ci-dessous). Ainsi, cette technique est surtout valable pour les études qui portent sur les dynamiques de population des mauvaises

herbes. La technique peut pas être toujours appropriée pour la corrélation de banques de semences avec les populations de plantules de mauvaises herbes, dans la mesure où elle peut confondre entre elles les semences mortes, dormantes et non dormantes. Des tests supplémentaires de routine sont disponibles pour déterminer la viabilité des semences (voir ci-dessous), mais jusqu'ici il n'y a pas de méthode de routine pour distinguer des semences dormantes des semences non-dormantes (consulter aussi Fennimore et *al.* 1999).

Identification des semences

Une fois que les semences sont plus ou moins séparées du reste par l'usage de la méthode d'extraction directe de semences, elles doivent être alors identifiées. En général la partie de l'échantillon qui reste après l'extraction directe de semences n'est pas composée de semences pures, mais d'un mélange de semences, d'autres matières organiques, et de particules de sol. Probablement que l'étape de la méthode d'extraction directe de semences qui prend le plus de temps est l'examen de ce mélange sous un fort grossissement, la localisation puis l'identification des semences. Un chercheur expérimenté doté d'une bonne vision et une collection de semences cataloguées est le meilleur outil possible pour l'identification de semences, mais à défaut, quelques excellents manuels existent auxquels on peut se référer. La plupart de ces manuels sont des manuels régionaux. Delorit, (1970) par exemple, est une source excellente pour les chercheurs d'Amérique du Nord.

L'analyse d'image, qui est, l'analyse par ordinateur d'images électroniques des semences isolées, est prometteuse pour l'identification des semences de mauvaises herbes. Cependant, il semble que peu effort ait été consacré, récemment, à ce sujet (Benoît *et al.* 1992, Buhler et Maxwell, 1993), probablement parce que l'oeil humain peut encore mieux distinguer les semences et les espèces beaucoup plus rapidement que n'importe quelle machine.

Un autre outil intéressant et moderne pour l'identification des semences de mauvaises herbes est l'utilisation des empreintes d'ADN. Cette méthode peut être la plus appropriée pour l'identification des espèces et des biotypes dont les semences ne peuvent être distinguer visuellement (Fennimore *et al.* 1999, Joel *et al.* 1998, Mucher, 2000).

Les procédés manuels de séparation et de comptage sont généralement exécutés sur des échantillons qui ont séché après tamisage et flottation. Malheureusement, les semences de quelques espèces (par exemple *Impatiens* spp.) perdent rapidement leur viabilité après séchage, ce qui introduit l'erreur dans les estimations de densités de semences viables.

Test de viabilité

Les semences qui sont isolées par extraction directe peuvent être viables ou mortes. Ces semences peuvent être testées pour leur viabilité. Le test le plus simple de viabilité est de d'apprécier la qualité des semences avec une pince de dissection à bout effilé, enlever les semences qui à l'évidence sont mortes, et faire germer celles qui ont une apparence ferme. Les semences qui germent donne une estimation du nombre de semences qui sont viables et non-dormantes. Cependant, il ne peut informer sur le nombre de semences viables mais dormantes.

La viabilité de semences peut être déterminée par le célèbre test de chlorure de tetrazolium (TZ). Le test TZ est simple pour les besoins de la plupart des chercheurs en malherbologie, mais pour les technologues de semences le test peut être tout à fait complexe. En général, les semences sont trempées dans une solution de TZ de 0,1à 0,2 % pour quelques heures à une semaine à 10-30° C, selon l'espèce et les objectifs de recherche. L'hydrogène libéré par les réactions de déshydrogénation dans les tissus vivants se combine avec TZ pour former un pigment rouge. Ainsi, si éventuellement les semences exposées à TZ virent au rose ou au rouge, alors ils contiennent du tissu vivant, tandis que celles sans la coloration rouge sont présumées mortes.

La complexité du test de TZ apparaît sous plusieurs formes. Par exemple, quand le point de croissance (axe embryonnaire) dans une semence n'est plus en mesure de croître, ces cotylédons et autres tissus peuvent toujours contenir assez de déshydrogénase et produire suffisamment de H (Hydrogène) pour induire une coloration rose/rouge au TZ. Par ailleurs, les microorganismes qui se développent sur des semences déjà mortes et engagées dans le processus de mortalité contiennent aussi de des déshydrogénases et produisent des H, qui peuvent réagir avec TZ et provoquer de faux résultats positifs. Une observation minutieuse des semences après exposition au TZ peut éliminer ces erreurs. L'observation d'une coloration rouge de la radicule et de l'hypocotyle ou du coléoptile est particulièrement importante pour une détermination précise de la viabilité.

Une publication de l'Association des Analystes Officiels de Semence (AOSA), Manuel du test au tétrazolium (Peters, 2000) (http://www.aosaseed.com/tetra/TZcommitteemain.htlm) fournit beaucoup d'excellents dessins spécifiques à des espèces et des indications pour l'utilisation correcte du TZ dans l'industrie de production commerciale des semence. Cependant, pour les mauvaises herbes, la détermination exacte de la viabilité des semences est plus un intérêt de recherche qu'une exigence économique et industrielle. Par conséquent, quelques unes des directives de l'AOSA qui extrêmement structurées et spécifiques aux espèces peuvent ne pas être appliquées. Les deux paragraphes suivants décrivent des procédures que nous avons trouvées utiles pour quelques espèces fréquentes en Amérique du Nord.

Là où c'est possible, couper les semences séchées à l'air en deux symétriquement au moyen d'une lame de rasoir à un tranchant, pour couper et exposer l'embryon. Ainsi, la face coupée de chaque moitié de la semence devrait montrer au moins des parties de la radicule et de l'hypocotyle (par exemple *Abutilon theophrasti* Medik.) ou la radicule et le coléoptile (par exemple *Setaria faberi* Herm.) Choisir la moitié de semence qui apparaît la plus intacte après la coupe, la placer sur papier buvard saturé avec 0,2 pour cent de TZ, et incuber à 25° C. Après 12 heures d'incubation, les semences viables montrent des points de croissance rouges, tandis que les semences mortes gardent leur couleur initiale. La période d'incubation est d'habitude trop courte pour une croissance importante de micro-organismes.

Les semences de quelques espèces ne se prêtent pas à une bissection symétrique le long de l'axe embryonnaire à cause de leur petite taille ou forme (exemple, de *Chenopodium album*). Ces types de semences peuvent être fractionnés par n'importe quel mode avec un rasoir tranchant pour que la radicule ou l'hypocotyle soit exposé sur au moins une moitié de la semence. Parce que la moitié de semence correspondante est difficile à discerner à cette étape, incuber les deux moitiés de la semence dans TZ. La semence est viable si chaque moitié expose le rouge après une incubation de 12 heures.

Vérification

La valeur des données obtenues peut être améliorée par le test et le calibrage à plusieurs étapes du processus d'extraction directe de semences. Le processus peut être validé en ajoutant un nombre connu de semences aux échantillons à tester, pour vérifier qu'elles peuvent être séparées, identifiées, et comptées avec une précision acceptable. Si la précision est faible, déterminer quelle étape dans le processus est en cause, et faire les ajustements appropriés sont importants pour l'amélioration du protocole. Les chercheurs ont besoin par exemple, de se poser les questions suivantes: est-ce que des semences sont perdues pendant le tamisage? Est-ce qu'elles peuvent être distinguées d'autres matières organiques ou contaminants minéraux du sol ? Est-ce que la viabilité peut être déterminée avec précision ? Est ce que les processus d'extraction ou de flottation affectent la viabilité? L'identification de semences et le comptage exact diminuent généralement avec l'augmentation du nombre de semences, la diminution de la taille des semence et la fatigue du personnel.

Les méthodes actuelles de comptage pour la détermination de la densité des semences viables dans les échantillons de banques de semences sont laborieuses et ne sont pas pratiques comme un moyen de caractérisation de la composition des espèces des banques de semences. L'exposition de l'ouvrier aux solutions salées et aux détergents, de même que les heures passées à regarder à travers une loupe ou un microscope de dissection, est de sérieuses contrainte. Une méthode qui marche pour quelques espèces va probablement être inadéquate pour d'autres espèces dont les semences diffèrent dans la forme, la taille, la durabilité, la facilité d'identification, et les caractéristiques de dormance. Les banques de semences agricoles dans le nord et le centre des États-Unis contiennent souvent entre 20-50 espèces, dont quelques unes sont présentes en nombres très limités. Il est peu probable qu'une seule méthode permette de séparer avec précision, détecter, et correctement identifier toutes les espèces. Ainsi, la méthode de séparation des semences est seulement appropriée pour une - ou juste quelques-unes - espèce cible à grosses semences où la précision peut être prouvée.

METHODE DE GERMINATION

La deuxième technique majeure pour le comptage des semences dans la banque de semences du sol est connue sous le nom de méthode de "germination". Cette technique est principalement utilisée pour calculer la densité de semences non-dormantes dans la banque de semences. Dans ce cas, les carottes de sol sont typiquement regroupées en unités logiques (exemple : 20 carottes d'une parcelle qui représente un traitement expérimental). Pour regrouper les carottes, elles sont mélangés à fond et posés sur des plateaux qui sont placés dans des incubateurs, sur des paillasses de serres, sur des cadres réfrigérés, ou dans pépinières suivant les objectifs de l'expérimentation et de la disponibilité des installations. Les échantillons doivent être protégés contre contamination des semences, des perturbations, et des granivores et herbivores. La protection est surtout importante dans les pépinières extérieures, mais même dans serres modernes, les semences aéroportées d'espèce tel que le pissenlit (*Taraxacum officinale* Weber) sont des contaminants courants qui entrent par les systèmes de ventilation.

Le sol dans les plateaux ne devrait pas dépasser la profondeur dont chaque espèce est supposée germer, typiquement moins de 5 cm, de préférence 2-3 cm pour les espèces à petites graines. Si le sol est riche en argile, il peut être mélangé avec des volumes connus de sable propre ou de terreau de commerce pour améliorer le drainage. Une procédure utile pour améliorer le drainage consiste à revêtir le fond du plateau avec du sable, puis de tissu gaze en nylon, et puis l'échantillon de sol. Le tissu gaze en nylon permet l'enlèvement et le remuage périodique de l'échantillon de sol (voir ci-dessous) pour améliorer la germination des semences dormantes, sans la contamination par le sol non-expérimental indésirable situé en profondeur.

Alors que les échantillons de sol argileux exigent un meilleur drainage d'eau, les échantillons de sol sableux ont besoin d'une meilleure rétention d'eau. Ceci peut être réalisé en revêtant les plateaux au fond avec la vermiculite ou la tourbe, séparé du sol sableux expérimental avec le tissu gaze en nylon. La vermiculite ou la tourbe propres peuvent aussi être mélangées avec l'échantillon de sol pour augmenter la capacité de rétention d'eau. Dans les serres, sur les cadres réfrigérés, et dans les pépinières, un tissu sombre peut être déployé pour couvrir les plateaux pour retarder l'évaporation et promouvoir la germination et l'émergence en évitant les manques temporaires d'eau. Les plateaux peuvent aussi être enveloppés dans des sacs en plastique transparents pour maintenir l'humidité du sol; mais ceci ne devrait jamais être fait au soleil, mais seulement dans les chambres de croissance où les températures peuvent être contrôlées avec précision.

La plupart des semences non-dormantes germent rapidement dans les plateaux décrits ci-dessus. Souvent 70 % des jeunes pousses émergeront pendant les deux premières semaines d'incubation, mais ceci dépend des niveaux de dormance. Toutes les jeunes pousses devraient être comptées et enlevées aussitôt que la plupart d'entre elles peuvent être identifiées. Le peu de jeunes pousses qui ne peuvent pas être facilement identifiées peuvent être transplantées dans des pots pour une identification ultérieure.

En l'absence d'émergence il est courant de mélanger le sol et de recommencer un autre cycle de germination et d'émergence. Le nombre de cycles varie selon les chercheurs. Roberts (1981) a suggéré de continuer le processus deux années de suite. Par rapport à notre expérience avec les espèces annuelles de l'été, la plupart des semences germent pendant le premier cycle de germination, environ 10 % de ce nombre au cours du second cycle, et très peu de semences germent au cours d'un troisième ou d'un quatrième cycle. Il n'y a pas de connaissance précise sur des espèces qui germent spécifiquement dans un cycle et pas dans l'autre. Pour cela, après deux ou trois cycles de germination nous stratifions d'habitude les échantillons (4° C) pendant quatre semaines ou plus, suivi par alternances de température avant de les retourner dans la serre. Le but de ceci est de briser la dormance des semences qui pourraient être en dormance secondaire pendant les cycles précédents de germination. L'intention est d'imiter les conditions du printemps qui favorisent la levée de dormance de beaucoup de semences d'espèces annuelles d'été. Quelques ouvriers exposent les échantillons dehors pendant l'hiver pour la même raison.

La période de l'année où l'échantillonnage a été fait peut influencer la façon dont les échantillons sont traités. Les échantillons pris tout juste après la libération des semences pourraient avoir besoin d'une période froide ou autre condition de stratification avant qu'elles ne soient en mesure de germer. Les échantillons pris à la fin de l'hiver dans des zones tempérées devraient être mis dans des plateaux de germination le plus tôt possible, puisque beaucoup de semences auraient déjà brisé leur dormance et sont prêtes à germer. Les échantillons prélevés mi-été dans des zones tempérées - après que la plupart des mauvaises herbes aient émergé et avant la nouvelle production de semences - représentent la banque de semences persistante (Baskin et Baskin, 2000) qui contient la plupart des semences dormantes. Ces échantillons exigeront probablement la stratification et/ou l'alternance de température pour briser la dormance et provoquer la germination. Dans les tropiques, les échantillons pris à la fin d'une saison pluvieuse devraient contenir des semences nouvellement produites qui pourraient avoir besoin d'une période sèche pour briser la dormance.

Quelques auteurs recommandent le tamisage pour réduire le volume d'échantillon. Le gravier et la matière organique plus gros que la taille des plus grosses semences attendues peuvent ainsi facilement être éliminés. Si le tamisage humide est utilisé, la taille de maille doit être très petite pour que les semences les plus petites soient retenues. Pour les sols de limon avec lesquels nous avons travaillé dans l'Ohio, le tamisage humide aboutit à un mélange boueux de sol et de matière organique difficile à manipuler; C'est pourquoi cette étape a été éliminée. Néanmoins, quelques auteurs considèrent cette étape importante pour la réduction du volume de l'échantillon et l'amélioration de la germination de quelques espèces (Thompson *et al.* 1997).

Il y a eu peu de tentatives pour valider la méthode de germination parce que c'est très difficile à réaliser. On pourrait ajouter un nombre connu de semences viables d'une espèce donnée à un volume de sol pour vérifier si le nombre exact de jeunes pousses émergera de l'échantillon. Cependant, les échantillons issus du champ contiennent des semences de différents âges et état de dormance, et la difficulté dans la procédure est d'obtient des jeunes pousses de telles semences, et non pas des semences prêtes à germer. Comme alternative, on peut trier des semences du sol suite à une germination 'exhaustive' dans un effort de trouver des semences viables qui n'ont pas répondu à la procédure. N'importe quelle tentative pour calibrer la méthode devrait tenir compte de toutes les espèces dignes d'intérêt. Un des mérites de la méthode de germination est sa capacité à obtenir une évaluation complète des espèces, y compris beaucoup

d'espèces qui sont relativement rares. Le calibrage ne serait donc pas pratique pour de telles analyses.

Beaucoup d'auteurs préfèrent les méthodes de germination à la séparation des semences à cause d'un grand nombre de contraintes que comporte cette dernière. Mais, les méthodes de germination sont seulement un peu moins laborieuses. Généralement, plusieurs mois sont requis pour obtenir des données, de sorte que cette méthode n'est pas pratique pour la prédiction des populations de mauvaises herbes potentielles au cours d'une saison de culture. Une connaissance spécialisée est nécessaire pour identifier avec précision les jeunes pousses. Il y a le problème inévitable de semences viables mais dormantes qui ne germent pas pendant la période du test de germination en dépit des efforts pour se conformer aux conditions écologiques requises en vue de briser la dormance et susciter la germination. Quelques auteurs ont utilisé les techniques de séparation des semences après la méthode de germination pour tenter de séparer ces semences. Un des avantages principaux de cette méthode par rapport au comptage est son utilité pour la détection d'une large gamme d'espèces pour l'analyse des communautés. Dans des échantillons d'expérimentations à long- terme avec des répétitions qui comprennent des traitements de labour et de rotation, nous avons détecté en utilisant cette méthode des semences prêtes à germer de 20-30 espèces y compris plusieurs espèces que nous n'avions pas prévues de trouver, en considérant la composition de la communauté de végétation de surface. Quelques unes des espèces étaient représentées par une poignée d'individus sur une seule parcelle, et il est peu probable que celles-ci auraient pu être détectées et identifiés convenablement par le comptages de semences.

ETUDES D'ENTERREMENT DE SEMENCES

Quelques uns des renseignements les plus valables en ce qui concerne le comportement des banques de semences ont été obtenus dans des expérimentations au cours desquelles les semences de mauvaises herbes ont été enterrées à dessein. Il y a trois approches fondamentales à ces types d'études qui sont: 1) bouteille inversée; 2) paquet de semences; et 3) méthodes de carottes ensemencées.

Bouteille inversée

Cette approche a été premièrement utilisée par Beal et d'autres dans la seconde moitié du siècle précédant. Cette méthode n'a plus été récemment utilisée. Comme le nom l'indique, les semences sont introduites dans des bouteilles remplies de sable, les bouteilles sont inversées, puis enterrées dans le sol. Les bouteilles sont déterrées à des intervalles de temps, parfois 20 années d'intervalle, et examinées pour germination et viabilité. Parce que les bouteilles sont inversées, les semences ne sont pas exposées au même niveau d'hydratation, de séchage, et de réhydratation comme les semences dans les sols au champ. La longévité apparaît anormalement longue pour beaucoup d'espèces étudiées dans ces expérimentations.

Paquet de semences

Cette approche commune permet aux semences d'être exposées à des conditions presque naturelles après les avoir confinées dans des sachets typiquement construits avec du tissu gaze en nylon résistante au pourrissement. Les sachets sont souvent enterrés à différentes profondeurs et déterrés pour analyse à des temps variés après l'enterrement. Dans ces expérimentations, la longévité de la semence est beaucoup plus courte que celle observée dans les expérimentations de bouteille inversée. Si les paquets de semences sont déterrés à des intervalles suffisamment courts, la perte de viabilité peut être attribuée à la germination (par l'observation des plantules ou de reste de plantules) ou simplement à la mortalité des semences. Ces études ont aidé énormément à la compréhension récente que la longévité des semences dans des conditions naturelles est souvent inférieure à cinq ans.

Carottes ensemencées

Cette technique (voir Teo-Sherrell et Mortensen, 2000) consiste à prélever une carotte de sol et à la remplacer avec du sol dépourvu de semences sauf celles qui y sont intentionnellement ajoutées. Ces études sont en apparence plus naturelles dans la mesure où les semences ajoutées sont exposées au microclimat, aux conditions microbiennes et de microfaune similaires à ceux des paquets de semences, mais aussi la macrofaune qui serait exclue par les petites mailles des sachets en nylon. Le problème de cette méthode est que les carottes ensemencés doivent être déterrées avec précision pour ne pas prélever par inadvertance la banque de semences naturelle du sol, puis il faut traiter la carotte de la même façon qu'une carotte de sol standard pour les études de banque de semences.

MOUVEMENT/DISTRIBUTION VERTICALE ET HORIZONTALE DE SEMENCES

Des études récentes de banques de semences ont documenté et modéliser le mouvement des semences dans le sol. Ces études se sont intéressées au mouvement de semences dus au labour ou au mouvement des perles synthétiques colorées pour mimer le mouvement des semences. Initialement, ces études se sont focalisées sur le mouvement vertical des semences causé par les charrues, des ébauchoirs, les disques, et les mouvements en situation de non-labour, avec l'idée que la profondeur d'enterrement est principalement fonction de l'instrument de labour. L'enterrement profond était associé à un nombre de processus démographiques potentiellement importants, telle que la germination fatale et la dormance imposée par le microclimat.

Plus récemment, le mouvement vertical de semences de mauvaises herbes causé par des opérations répétées de labour utilisant n'importe quel type d'instruments de labour a été étudié et modélisé (Cousens et Moss; 1990, Mead *et al.* 1998; Staricka *et al.* 1990). Ces études confirment toute tendance ; à savoir que des instruments similaires enterrent les semences dans des proportions similaires à des profondeurs similaires quel que soit le type de sol et la localité où l'expérimentation a été conduite (Forcella *et al.* 1994). Ceci suggère une universalité très satisfaisante des modèles d'enterrement de semences déclenchés par le labour.

Des études complémentaires ont examiné aussi le mouvement horizontal de semences de mauvaises herbes comme résultat des machines de labour. Bien que le mouvement induit par l'instrument de labour puisse être appréciable, de tels mouvements horizontaux sont très limités comparativement à ceux causés par des moissonneuse- batteuses.

COMMENT ECHANTILLONNER LA VEGETATION DE SURFACE?

Beaucoup de livres traitant de l'écologie des plantes énumèrent des protocoles d'échantillonnage de la végétation de surface, et nous ne reviendrons pas dessus. Cependant, en ce qui concerne la relation entre la banque de semences et la végétation de surface quelques unes de nos expériences peuvent être utiles.

La période du comptage des plantes est importante si l'on veut associer les résultats avec les densités de banque de semences. Une fois encore, les échantillons de plantes doivent être pris à un temps logique, qui suit, et ne précède pas l'échantillonnage pour les banques de semences. Selon les buts poursuivis par la recherche, les comptages peuvent être faits à différentes périodes du cycle de la culture; par exemple, (a) immédiatement avant le semis de la culture; (b) 4 semaines après le semis; (c) au développement maximum de l'index de surface foliaire de la plante; (d) à la récolte, et parfois (e) aussi après la moisson. La proportion de la population totale de plantes qui émergent avant chaque comptage peut varier substantiellement d'un site à un autre et d'année en année, selon le microclimat.

Les mauvaises herbes présentes quatre semaines après le semis de la culture, représentent d'habitude la proportion la plus importante de la population totale de mauvaises herbes, au moins du point de vue du contrôle de mauvaises herbes dans la culture. La densité représentée par cette proportion, peut cependant ne pas correspondre nécessairement à la densité de la banque de semences. Dans ce cas, les chercheurs sont conseillés de tenter une corrélation entre les densités de banque de semences et les densités de mauvaises herbes aux temps a + b, a + b + c, b + c, et ainsi de suite. C'est seulement, après que ces types d'évaluations aient été faites que les chercheurs peuvent conclure qu'il existe ou n'existe pas de rapport entre les densités de banque de semences et la végétation de surface.

La surface des quadrats pour les recensements de plantes est d'habitude 50-5000 fois plus grande que celle des carottes de sol. Par conséquent, on ne devrait pas espérer une corrélation étroite entre les densités de semences et de plantes (Cardina et Sparrow, 1996). Pour cette raison et bien d'autres, la corrélation de rang peut être plus appropriée que la régression pour relier les banques de semences à la végétation de surface.

Les tests simples de variance-minimum aident à déterminer rapidement le nombre de quadrats à utiliser. En tout cas, des plusieurs quadrats (par exemple 10 de 0,1 m^2 chacun par parcelle) sont préférables à un seul quadrat (par exemple 1 m^2) par parcelle.

L'arrangement des quadrats n'est probablement pas trop important pourvu que le positionnement des quadrats couvre la longueur et la largeur de la parcelle ou du champ (Colbach et al. 2000). Quelques auteurs placent des quadrats au-dessus, ou à côté du point où les carottes de sol ont été prélevées. Bien que logique, cela peut n'avoir que peu d'effet pratique sur les résultats étant donné l'agrégation extrême de beaucoup de banques de semences.

CONCLUSIONS

L'intérêt récent généralisé pour l'étude des banques de semences de mauvaises herbes se reflète dans les nombreuses communications sur ce sujet au cours du Troisième Congrès International de Malherbologie (Anonyme, 2001), et des symposia spécialement consacrés aux banques de semences et sponsorisés par l'Association pour la Biologie Appliquée organisés en 1998 (Champion *et al.* 1998) et en 2003 (Collection, Royaume Uni). Avec un tel enthousiasme pour ce sujet, quelques directives concernant les protocoles et techniques d'échantillonnage sont nécessaires, surtout pour les chercheurs juniors en début de carrière, ou même les chercheurs seniors qui éprouvent un intérêt nouveau pour les études de banques de semences.

Aucun protocole ou technique n'aura une approbation universelle, mais il y a un certain nombre de points importants dont les chercheurs dans le domaine des banques de semences devraient être conscients, et ceux-ci sont discutés dans le rapport. Ces points concernent la précision de l'échantillonnage, les modèles d'échantillonnage, les périodes d'échantillonnage, le test de viabilité des semences, la séparation des semences, l'identification des semences et des jeunes pousses, et l'échantillonnage de la végétation de surface. Si les directives fournies dans ce rapport n'améliorent pas les résultats des futures études de banque de semences, nous espérons qu'elles aideront au moins à alléger quelques uns des travaux ennuyeux impliqués dans ce type de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

Ball, D.A. & Miller, S.D. 1989. A comparison of techniques for estimation of arable seed banks and their relationship to weed flora. *Weed Res.*29: 365-373.

Bàrberi, P., Macchia, M. & Bonari, E. 1998. Comparison between the seed extraction and seedling emergence methods for weed seed bank evaluation. *Aspects of Applied Biology* 51: 9-14.

Baskin, C. C. & Baskin, J. M. 1998. *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination.* Academic Press, New York.

Benoit, D.L., Kenkel, N.C. & Cavers, P.B. 1989. Factors influencing the precision of soil seed bank estimates. *Can. J. of Botany* 67: 2833-2840.

Benoit, D.L., Derksen, D.A. & Panneton, B. 1992. Innovative approaches to seedbank studies. *Weed Sci.* 40: 660-669.

Buhler, D.D. & Maxwell, B.D. 1993. Seed separation and enumeration from soil using K_2SO_3-centrifugation and image analysis. *Weed Sci.* 41: 298-302.

Cardina, J. & Sparrow D.H. 1996. A comparison of methods to predict weed seedling populations from the soil seedbank. *Weed Sci.* 44: 46-51.

Cardina, J., Sparrow, D.H. & McCoy, E.L. 1996. Spatial relationship between seedbank and seedling populations of common lambsquarters (*Chenopodium album*) and annual grasses. *Weed Sci.* 44: 298-308.

Champion, G.T, Grundy, A.C., Jones, N.E., Marshall, E.J.P. & Froud-Williams, R.J., eds. 1998. *Weed Seedbanks: Determination, Dynamics, and Manipulation.* Association of Applied Biologists, RH1, Wellesbourne, UK, 296 pp.

Chauvel, B., Gasquez, J. & Darmency, H. 1989, Changes of weed seed bank parameters according to species, time, and environment. *Weed Res.*29: 213-219.

Colbach, N., Dessaint, F. & Forcella, F. 2000. Evaluating field-scale sampling methods for the estimation of mean plante densities of weeds. *Weed Res.*40: 411-430.

Cousens, R. & Moss, S.R. 1990. A model of the effects of cultivation on the vertical distribution of weed seeds within soil. *Weed Res.*30: 61-70.

Delorit, R.J. 1970. *Illustrated taxonomy manual of weed seeds.* University of Wisconsin Agronomy Publications, River Falls, Wisconsin, USA. 175 pp.

Fay, P.K. & Olsen, W.A. 1978. Technique for separating weed seed from soil. *Weed Sci.*26: 530-533.

Fennimore, S.A., Nyquist, W.E., Shaner, G.E., Doerge, R.W. & Fole, M.E. 1999. A genetic model and molecular markers for wild oat (Avena fatua L.) seed dormancy. *Theoretical and Applied Genetics* 99: 711-719.

Forcella, F. 1992. Prediction of weed seedling densities from buried seed reserves. *Weed Res.*32: 29-38.

Forcella, F., Buhler, D.D. & McGiffen, M.E. 1994. Pest management and crop residues. pp. 173-189. *In* Hatfield, J.L. & Stewart, B.A., eds. *Crops Residue Management.* Lewis Publishers, Ann Arbor, Michigan, USA.

Forcella, F., Eradat-Oskoui, K. & Wagner, S.W. 1993. Application of weed seedbank ecology to low-input crop management. *Ecological Applications* 3: 74-83.

Gross, K.L. & Renner, K.A. 1989. A new method for estimating seed numbers in soil. *Weed Sci.* 37: 836-839.

Grundy, A.C. & Mead, A. 1998. Modelling the effects of seed depth on weed seedling emergence. *Aspects of Applied Biology* 51: 75-82.

Joel, D.M., Portnoy, V.H. & Katzer, N. 1998. Use of DNA fingerprinting for soil-borne seed identification. *Aspects of Applied Biology* 51: 23-27.

Jones, N. 1998. Number of soil cores required to accurately estimate the seed bank on arable land. *Aspects of Applied Biology* 51: 1-8.

Leck, M.A., Parker, V.T. & Simpson, R.L., eds. 1989. *Ecology of soil seed banks.* Academic Press, New York. 462 pp.

Luschei, E.C., Buhler, D.D & Dekker, J.H. 1998. Effect of separating giant foxtail (Setaria faberi) seeds from soil using potassium carbonate and centrifugation on viability and germination. *Weed Sci.* 46: 548-548.

Malone, C.R. 1967. A rapid method for enumeration of viable seeds in soil. *Weeds* 15: 381-382.

Mead, A., Grundy, A.C. & Burston, S. 1998. Predicting the movement of seeds following cultivation. *Aspects of Applied Biology* 51: 91-98.

Mucher, T. 2000. Characterization of weed beet in Germany and Italy. *J. of Sugar Beet Research* 37: 9-38.

Peters, J., ed. 2000. *Tetrazolium Testing Handbook.* Contribution No. 29 to the Handbook on Seed Testing. AOSA.

Roberts, H. A. 1981. Seed banks in soils. *Advances in Applied Biology* 6: 1-55.

Schweizer, E.E., Lybecker, D.W. & Wiles, L.J. 1997. Important biological information needed for bioeconomic weed management models. Chapter 1. pp. 1-24. *In* Hatfield, J.L., Buhler, D.D, Stewart, B.A., eds. *Integrated weed and soil management.* Ann Arbor, Michigan, USA. Lewis Publishers

Staricka, J.A., Burford, P.M., Allmaras, R.R. & Nelson, W.W. 1990. Tracing the vertical distribution of simulate shattered seeds as related to tillage. *Agronomy J.* 82: 131-134.

Teo-Sherrell, C.P.A., Mortensen, D.A. 2000. Fates of buried *Sorghum bicolor* ssp. *drummondii* seed. *Weed Sci.* 48: 549-554.

Wiles, L.J. & Schweizer, E.E. 1999. The cost of counting and identifying weed seeds and seedlings. *Weed Sci.* 47: 667-673.

Paramètres pour la compétition mauvaise herbe - culture

M. Sattin et A. Berti

INTRODUCTION

Dans la plupart des pays en développement, l'agriculture emploie plus que les trois-quarts de la main-d'oeuvre et fournit une source majeure du PNB à concurrence de 35-40 % (Maskey, 1997). Une question cruciale de politique est comment augmenter le revenu des paysans à faibles ressources sans endommager la ressource naturelle de base. Une approche holistique basée sur la Gestion Intégrée des Déprédateurs (connue comme IPM), de même que sur des principes économiques solides, fournirait cadre utile pour protéger les ressources et le revenu des paysans.

Depuis son adoption, l'IPM (Gestion Intégrée des Déprédateurs) et sa composante, la Gestion Intégrée des Mauvaises Herbes (IWM), est devenu la base pour toutes activités de protection des végétaux de FAO parce qu'elle contribue directement à l'accomplissement de l'agriculture durable dans les pays en développement (Labrada et Parker, 1994).

Il faut noter que IWM présente quelques différences importantes par rapport aux autres secteurs de IPM:

1. La flore de mauvaises herbes inclut d'habitude plusieurs espèces qui infestent en même temps la même parcelle ou le même champ, si bien que dans la pratique, il est normalement nécessaire d'estimer la perte totale causée par l'ensemble des espèces au lieu d'une seule espèce. Cependant, il y a des situations dans lesquelles l'infestation est monospécifique, ou peut être considérée comme telle par rapport aux résultats de la compétition (par exemple les infestations d'avoines sauvages dans le blé, *Echinochloa crus-galli* dans le riz, les graminées dans les cultures de dicotylédones déjà traitées en pré ou post-levée avec des herbicides pour contrôler les mauvaises herbes à feuilles larges).

2. Les mauvaises herbes ont une périodicité élevée, avec des plantes qui co-existent à différentes étapes de développement; chaque espèce et chaque stade de développement d'une espèce a un impact différent et une sensibilité différente aux mesures de contrôle, surtout au contrôle chimique des mauvaises herbes.

3. Les herbicides ne contrôlent pas généralement une seule espèce mais plus d'une, chacun avec un niveau différent d'efficacité; bien que des herbicides avec un spectre d'action extrêmement spécifique existent. Il n'est donc pas possible d'étendre simplement au contrôle de mauvaises herbes l'approche utilisée pendant un certain dans le secteur de l'entomologie, où chaque insecte est contrôlé avec des produits spécifiques.

Pour exécuter une stratégie de IWM avec succès, la gestion de mauvaises herbes devrait identifier les problèmes spécifiques dans un champ et pour cela quelques connaissances fondamentales sur l'écologie et la biologie des mauvaises herbes et de la culture sont nécessaires pour prédire correctement l'impact d'une infestation de mauvaises herbes sur le rendement de la culture. Dans ce contexte, les caractéristiques de croissance de mauvaises herbes et de la cultures et la dynamique d'émergence des mauvaises herbes sont des aspects importants (Akobundu, 1998; Forcella, 1998). Beaucoup de paysans dans les pays en développement ignorent plusieurs aspects de l'interférence des mauvaises herbes et le meilleur moment pour les éliminer mauvaises herbes (Akobundu, 1998; Labrada, 1996 et 1998), bien qu'il y ait des exceptions. Ellis-Jones *et al.* (1993) ont constaté la reconnaissance répandue au Zimbabwe de l'importance du désherbage

précoce pour la suppression des mauvaises herbes et l'amélioration de l'infiltration de l'eau de pluie.

La germination des mauvaises herbes se fait généralement en cohortes de jeunes pousses apparaissant sur une période étendue de temps et est lourdement influencée par les conditions climatiques, le type de sol et le système de culture (Vleeshouwers, 1997). Le temps des premières émergences diffère d'une année à l'autre et varie selon les exigences écologiques de l'espèce (principalement la température et l'humidité du sol - Forcella *et al.* 1997). Il est aussi bien établi, et a été expérimentalement quantifié pour plusieurs cultures et plusieurs types d'infestation de mauvaises herbes (Zimdahl, 1988; Berti *et al.* 1996), que le temps relatif d'émergence des culture et des mauvaises herbes et la période de désherbage influencent beaucoup la production de la culture.

Dans de petits champs des pays en développement plus de 50 % du temps de travail est consacré au désherbage, et est principalement fait par les femmes et les enfants de la famille du paysan (Ellis-Jones *et al.* 1993; Akobundu, 1996). Dans les systèmes de culture traditionnels, la connaissance de la période dite 'période critique' de compétition permettrait aux paysans de faire l'usage le plus judicieux que possible des ressources limitées en main-d'ocuvre. Dans des conditions de pression moyenne des mauvaises herbes, la période critique est approximativement centrée sur le premier tiers du cycle de croissance de la culture. Par exemple, plusieurs cultures majeures des climats tempérés (par exemple maïs, soja, tournesol) prennent 100-140 jours après émergence (JAE) à mûrir et la période critique se situe souvent entre 25-40 JAE (Zimdahl, 1988; Doll, 1994). Evidemment, la période critique change selon la compétitivité relative de la culture et des mauvaises herbes: plus faible est la compétitivité de la culture (et/ou plus élevée est la compétitivité de la flore des mauvaises herbes) plus longue est la période où la culture doit être maintenue propre pour éviter des pertes de rendement significatives.

COMPETITION ET RENDEMENT DE CULTURE

La présence de mauvaises herbes dans une culture conduite à un nombre élevé de plantes sur une même surface. Etant donné que la densité de culture est déjà réglée à un niveau qui optimise le rendement pour le cultivar dans cet environnement, la présence de mauvaises herbes conduira à une réduction du rendement moyen de la culture. Dans un champ infesté il est possible d'identifier différentes composantes de l'effet compétitif général:

- compétition intraspécifique entre les plantes de l'espèce cultivée;
- compétition interspécifique entre les plantes de l'espèce cultivée et les espèces de mauvaises herbes;
- compétition interspécifique entre les plantes de différentes espèces de mauvaises herbes;
- compétition intraspécifique entre les plantes d'une même espèce de mauvaise herbe.

PREDICTION DE LA PERTE DE RENDEMENT CAUSEE PAR UNE SEULE ESPECE DE MAUVAISE HERBE

En supposant que la densité de culture ne varie pas significativement, c'est à dire que l'effet de la compétition intra-spécifique entre les plantes de l'espèce cultivée est constante, une situation simplifiée peut être analysée: l'effet d'une infestation monospécifique sur le rendement d'une culture. La perte de rendement causée par les mauvaises herbes peut être prédite avec un niveau acceptable de précision par l'usage de modèles mathématiques. Ceux-ci peuvent être empiriques ou mécanistes. Les modèles empiriques sont basés sur des rapports mathématiques empiriques entre quelques variables indépendantes importantes (par exemple densité de mauvaise herbe ou

couverture, taux de croissance, période d'émergence des mauvaises herbes par rapport à celle de la culture) et une variable dépendante (d'habitude le rendement de la culture) dont les variations devraient être interprétées et prédites. Les modèles mécanistes sont plutôt basés sur les processus de croissance (par exemple interception de la lumière, photosynthèse, répartition de matière sèche entre différentes parties des plantes en compétition (culture et mauvaises herbes); ils sont évidemment beaucoup plus complexes que le précédant et exige une bonne connaissance des mécanismes et des interactions impliquées dans le système culture-mauvaises herbes et une grande quantité de données ou d'information comme input. Ces modèles sont d'un utilité pratique directe limitée, mais sont de bons outils d'étude et de recherche à partir desquels des modèles empiriques beaucoup plus simples peuvent être construits.

Dans ce chapitre, seuls les modèles empiriques seront considérés.

@Beaucoup de modèles empiriques ont été développés pour décrire, et si possible prédire, l'effet des mauvaises herbes dans les cultures, dont plusieurs sont basés sur la relation entre la perte de rendement de la culture et la densité des mauvaises herbes (Cousens, 1985b). Dans une tentative pour résoudre les problèmes liés à la prédiction de perte de rendement par rapport à la période d'émergence des mauvaises herbes, des modèles alternatifs ont été proposés basés sur la surface relative des feuilles des mauvaises herbes et de la culture.

Prédiction de perte de rendement sur la base de la densité de mauvaise herbe.

Le modèle le plus largement utilisé pour décrire la perte de rendement dépendant de la densité de mauvaises herbes est basé sur le modèle d'hyperbole rectangulaire (Cousens, 1985a):

$$Y_L = \frac{iD}{1 + \frac{iD}{a}} \qquad (1)$$

Où Y_L est la perte relative de rendement, D est la densité de mauvaises herbes, i est un paramètre qui représente la pente initiale de la courbe et a représente la perte maximale de rendement observée lorsqu'il y a une très forte densité de mauvaises herbes (la Figure 1).

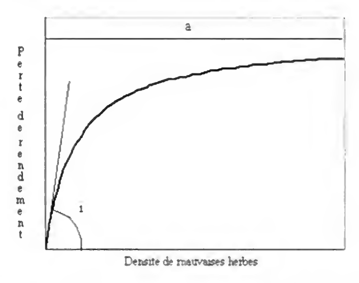


Figure 1. L'hyperbole rectangulaire (de Cousens, 1985a) qui relie la perte relative de rendement à la densité d'une espèce de mauvaise herbe.

Les deux paramètres varient aussi avec l'association culture-mauvaises herbes de même qu'avec la densité de culture, la période d'émergence de la mauvaise herbe et de la culture et la fertilité du sol. Les valeurs de *i* et *a* peuvent donc être utilisées pour comparer les différentes associations culture-mauvaises herbes dans des expérimentations additives de compétition (c à d. quand la mauvaise herbe est ajoutée à une culture semée à une densité fixée).

L'équation (1) fournit la perte de rendement relative, qui ne peut pas être mesuré directement, mais seulement calculé en commençant par des rendements observés avec et sans mauvaises herbes. Cependant, même les mesures prises sur des parcelles contrôle sans mauvaise herbe peuvent être affectées par l'erreur expérimentale, donc l'équation (1) peut être adaptée pour inclure Y_{WF} parmi les paramètres:

$$\mathrm{Y} = Y_{WF}\left(1-\frac{i\,\mathrm{D}}{1+\frac{i\,\mathrm{D}}{a}}\right) \qquad (2)$$

Le troisième paramètre Y_{WF} représente le rendement du contrôle sans mauvaise herbe, qui peut ainsi être estimé en utilisant toutes les données observées et pas seulement celles des parcelles contrôle.

Les équations (1) et (2) supposent que les mauvaises herbes émergent en même temps que la culture, mais dans la pratique ce n'est pas le cas. Cousens *et al.* (1987) ont introduit donc une modification au modèle ci-dessus décrit pour tenir compte au même moment de la densité des mauvaises herbes et de la période relative d'émergence de la culture et des mauvaises herbes:

$$\mathrm{Y_L} = \frac{i\,\mathrm{D}}{e^{c \cdot te}+\frac{i\,\mathrm{D}}{a}} \qquad (3)$$

Où Y_L, D, *i* et *a* ont la même signification que dans (1), *te* est le temps relatif d'émergence de la culture et des mauvaises herbes et *c* est le paramètre de régression qui exprime la variation de la compétitivité des mauvaises herbes selon le retard avec lequel elles émergent.

Le modèle (3) est une amélioration de (1) puisqu'il permet aux données expérimentales d'être mieux décrites quand l'émergence des mauvaises herbes ne se fait pas simultanément avec celle de la culture, mais avec des émergences très échelonnées la détermination de *te* devient difficile et prend du temps et l'estimation des paramètres discutable. Qui plus est, l'estimation des paramètres *i* et *a*, dépendant aussi de celle du paramètre *te*, montre généralement une plus grande variabilité au cours des années et avec les localités. Cet inconvénient peut, au moins partiellement, être prévenue en utilisant comme 'échelle biologique' la somme des températures, au lieu de jours.

La densité de mauvaise herbe est la variable la plus ordinairement utilisée pour expliquer les variations dans la perte de rendement de culture. Ceci a des avantages clairs, tel que: a) la simplicité de son contrôle dans les expérimentations; b) la détermination au champ est relativement facile et rapide. Elle a aussi quelques inconvénients: a) au champ il est difficile de contrôler la période d'émergence des mauvaises herbes par rapport à celui de la culture,

particulièrement quand l'émergence se fait par vagues; b) les modèles qui en découlent ont des bases éco-physiologiques faibles.

Pour ces raisons, quelques auteurs ont essayé d'identifier une autre variable qui serait en même temps facile à mesurer, prend en compte la compétitivité des mauvaises herbes déterminée par les différentes périodes d'émergence de la culture et des mauvaises herbes, et irréprochable sur le plan de l' éco-physiologie.

Prédiction de perte de rendement basée sur la surface foliaire ou sur le taux de couverture relative de la mauvaise herbe.

Kropff et Spitters (1991) ont proposé une relation basée sur la surface foliaire relative (L_w) définie comme étant la ration entre l'indice de surface foliaire (LAI) de la mauvaise herbe et le LAI total de la culture et des mauvaise herbe:

$$Lw = \frac{LAI_w}{LAI_c + LAI_w} \qquad (4)$$

Où LAI_w et LAI_c sont les indices de surface foliaire de la mauvaise herbe et de la culture, respectivement. L_w peut varier de 0 (l'absence de mauvaises herbes) à 1 (couverture totale par la mauvaise herbe seule). Les auteurs, en commençant par les processus qui contrôlent la croissance de la culture et les résultats de plusieurs simulations faites avec un modèle de compétition éco-physiologique, démontrent que la surface foliaire relative comparée à celle de la culture au moment « du recouvrement de la ligne de semis » pourrait être une mesure cruciale du processus de compétition et très bien corrélée avec la perte totale de rendement.

La relation entre la perte relative de rendement Y_L et L_w est exprimé par:

$$Y_L = \frac{q\ Lw}{1 + (q-1)\ Lw} \qquad (5)$$

Où q est un indice de compétitivité typique d'une mauvaise herbe donnée dans une culture, appelé coefficient de dommage relatif.

Kropff *et al.* (1995) ont modifié l'équation (5) en insérant un paramètre m qui représente les dommages maxima causés par les mauvaises herbes (asymptote de l'hyperbole):

$$Y_L = \frac{q\ Lw}{1 + \left(\frac{q}{m} - 1\right) Lw} \qquad (6)$$

Le modèle (6) est comparable à (1) avec la surface foliaire relative au lieu de la densité.

Considérer L_w au lieu de la densité, prend en compte, au moins indirectement, le fait que les dommages causés par les mauvaises herbes dépendent du développement relatif de la culture et des mauvaises herbes et donc aussi leur temps relatif d'émergence. Une certaine valeur de L_w peut être donnée par quelques plantes qui émergent précocement ou par beaucoup d'autres qui émergent tardivement.

Le problème majeur avec cette méthode est la difficulté pour mesurer L_w rapidement et avec fiabilité. En fait, la mesure précise de la surface foliaire est possible avec un échantillonnage

destructif de la végétation (mauvaises herbes et culture), mais cette méthode n'est ni rapide ni rentable. Une alternative est une appréciation visuelle, au cours de laquelle l'opérateur estime la ration entre la surface foliaire relative de la culture et des mauvaises herbes. Avec un entraînement approprié il est fort possible d'obtenir de bons résultats, mais un certain niveau de subjectivité dans les évaluations de L_w ne peut pas être éliminée.

Au lieu de L_w, la compétitivité d'une infestation peut être évaluée en se basant sur la répartition de la couche supérieure du couvert végétal entre la culture et les mauvaises herbes (Couverture Relative, RC). En observant verticalement la voûte foliaire d'en haut, la partie supérieure du couvert végétal est formée par les feuilles de la culture et des mauvaises herbes: la proportion entre la surface du sol couverte par les feuilles de mauvaises herbes et la couverture totale (c'est à dire mauvaises herbes plus culture) représente le RC.

W et C étant les surfaces couvertes par les mauvaises herbes et la culture, respectivement, RC est donné par:

$$RC = \frac{W}{W + C} \qquad (7)$$

Plus cette valeur est élevée, plus grande sera la part du rayonnement solaire intercepté par les mauvaises herbes, et donc la compétition causée par elles sera plus intense. Cette méthode suppose que: 1) l'interférence pour la lumière englobe tous les autres mécanismes d'interférence : le feuillage peut servir d'intégrateur des effets combinés de la compétition pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs, et probablement aussi les effets allélopathiques, puisque toutes ces interférences réduisent la hauteur, le poids et donc la surface foliaire et l'interception du rayonnement solaire; 2) l'effet compétitif des mauvaises herbes qui sont plus courtes que la culture à la couverture totale du sol le feuillage est négligeable; en d'autres termes, seulement les plantes qui peuvent croître au delà, au moins, atteindre une hauteur similaire à celle de la culture peuvent établir la compétition avec succès. L'utilisation de cette variable était proposé pour des cultures de basses ou de taille moyenne (exemple. les pois, le soja) (Berti et Sattin, 1996): dans ces conditions, l'utilisation du RC est valable. L'applicabilité de cette méthode reste à évaluer avec des cultures plus largement espacées et de plus grande taille, tels que le maïs et le tournesol.

Le ratio entre RC et la perte de rendement de culture est similaire à (6):

$$Y_L = \frac{q\ RC}{1 + \left(\frac{q}{m} - 1\right) RC} \qquad (8)$$

L_w et RC sont de bon indicateurs de perte de rendement au stade de la couverture du sol par la végétation (Kropff, 1988; Pike *et al.* 1990; Lutman, 1992; Berti et Sattin, 1996), quand il est trop tard pour entreprendre quelque mesure de contrôle que ce soit. Une estimation précoce de ces indicateurs de perte de rendement suppose qu'il faut suivre leur évolution à partir du moment où ils ont été estimés jusqu'à la couverture totale du sol par la végétation. Ceci représente une source additionnelle de variabilité qui doit être déterminée au moyen d'expérimentations appropriées.

L'avantage principal de RC est qu'il est facile à mesurer. Pendant que L_w est basée sur les ratios de LAI et exige donc que toutes les surfaces foliaires soient déterminées, RC exige la mesure des ratios de couverture entre la culture et les mauvaises herbes en observant la voûte verticalement d'en haut. Ceci peut être fait soit au moyen d'une estimation visuelle subjective soit, avec une plus grande précision, par des mesures à partir de photographies prises de 2-3 m au-dessus de la

culture. La possibilité d'utilisation d'équipement optique qui prend automatiquement cette mesure peut être aussi prévue.

L'accent devrait être mis sur le fait que les données fondamentales utilisées pour la détermination de L_w et de RC ne donnent aucune indication sur la composition de la flore de mauvaises herbes, information qui est fondamentale pour un choix judicieux du type de contrôle (par exemple l'herbicide).

DOMMAGE CAUSE PAR LES INFESTATIONS MIXTES

L'information sur l' association simple d'une culture et d'une mauvaise herbe, bien qu'intéressante, est d'intérêt pratique limité parce que les infestations incluent normalement des espèces variées et les mesures de contrôle, en particulier les herbicides, ont un spectre d'efficacité bien-défini.

Les choix entre les options de contrôle (s'il faut traiter et comment traiter) doivent donc être faits, en tenant compte aussi bien des dommages qui seraient causés en l'absence de contrôle que de ceux causés par les mauvaises herbes qui ont survécu à un traitement donné. Dans les deux cas, ces évaluations exigent que l'effet compétitif d'une infestation mixte soit estimé.

Dans le cas des ratios entre densité et perte de rendement, les méthodes communément utilisées sont basées sur la transformation des densités observées en des valeurs qui peuvent être considérées comme additives. Il est évident que deux mauvaises herbes différentes, même à densité égale, causeront habituellement différentes pertes de rendement: il n'est donc pas possible d'additionner les valeurs de densité observées pour estimer l'effet compétitif de l'infestation dans son ensemble.

Il y a trois approches principales: le premier, proposé par Wilkerson *et al.* (1991) implique le calcul de la charge compétitive totale (TCL). Cette méthode est utilisée dans le programme HERB pour le choix d'options de contrôle de post-levée dans le maïs et le soja. La deuxième approche est basée sur le concept de densité équivalente (Deq) (Berti et Zanin, 1994) et est la base d'un système d'aide à la décision (GESTINF) adaptée aux conditions italiennes et actuellement à l'étape expérimentale en milieu paysan. La troisième se réfère à la couverture relative et est toujours à l'étape expérimentale.

Méthode de charge compétitive totale

La capacité compétitive de diverses espèces de mauvaises herbes est définie par des expériences de compétition en utilisant une méthode d'index, c.-à-d. en attribuant une valeur arbitraire K à l'espèce la plus compétitive et en classant les autres par rapport à leur compétitivité relative avec l'espèce de référence. L'indexation est basée sur les relations linéaires entre le rendement de la culture ou la biomasse et la densité de mauvaises herbes, qui, pour les basses valeurs de densité, représente une bonne approximation de la relation hyperbolique qui existe entre ces deux variables.

Pour les faibles valeurs de densité des mauvaises herbes (D), le rendement de la culture peut être donné par:

$$Y = a + b\,D \qquad (9)$$

Le ratio b/a représente un indice de la capacité compétitive de l'espèce considérée. Un indice de compétitivité (CI) peut être défini donc pour l'espèce iéme, de la formule suivante:

$$CI_i = \frac{b_i/a_i}{b_r/a_r} K \qquad (10)$$

Où b_r et a_r sont les paramètres de régression de l'espèce de référence.
K est un facteur d'échelle qui peut prendre n'importe quelle valeur; les auteurs ont choisi la valeur 10. Dans ce cas, les mauvaises herbes sont classées suivant une échelle décimale avec CI = 10 pour l'espèce de référence. Les CIs sont les données fondamentales utilisées pour l'évaluation de la perte de rendement dans une situation réelle au champ. Puis, en multipliant la densité observée de la iéme espèce par son CI, la charge compétitive (CL) pour cette espèce est donnée par:

$$CL_i = CI_i \ D_i \qquad (11)$$

La somme de ces valeurs pour les diverses espèces présentes représente la TCL d'une infestation donnée:

$$TCL = \sum_i CL_i \qquad (12)$$

La perte de rendement de la culture peut être estimée en se basant sur la TCL de l'infestation. Selon Wilkerson *et al.* (1991) la perte de rendement pour les faibles niveaux d'infestation peut être calculée par une relation linéaire. Avec l'augmentation du CL, les mauvaises herbes commencent à interférer les unes avec les autres de même qu'avec la culture et l'effet compétitif causé par chaque plante diminue. Dans ces conditions la perte de rendement de la culture suit une tendance hyperbolique. Dans le cas du soja, Wilkerson *et al.* (1991) ont fixé le passage de la relation linéaire à la relation hyperbolique à une valeur de TCL de 50. Il convient de mentionner que ce modèle a été étalonné pour la région centrale du Sud des États-Unis, où le soja était cultivé dans des interlignes à grand espacement.

L'expression complète de la perte de rendement comme une fonction de TCL sera donc:

$$Y_L \% = \begin{cases} 0.5 \ TCL & \text{for } TCL \leq 50 \\ 25 + \dfrac{55\,(TCL - 50)}{TCL + 60} & \text{for } TCL > 50 \end{cases} \qquad (13)$$

Méthode de densité équivalente

La Deq d'une espèce donnée de mauvaise herbe se définie comme étant la densité d'une espèce de référence qui détermine une perte de rendement égale à celle causée par l'espèce étudiée à la densité mesurée. La perte de rendement de la culture en compétition avec l'espèce de référence est:

$$Y_L = \frac{i_{ref} \ D}{1 + \dfrac{i_{ref} \ D}{a_{ref}}} \qquad (14)$$

Alors que, pour ième espèce présente on a:

$$Y_L = \frac{i_i \; D}{1 + \frac{i_i \; D}{a_i}} \qquad (15)$$

De la définition ci-dessus mentionnée, la Deq de i $_{\text{ième}}$ l'espèce (Deqi) est la valeur de la densité de l'espèce de référence qui égalise les deux équations précédentes:

$$\frac{i_{ref} \; Deq_i}{1 + \frac{i_{ref} \; Deq_i}{a_{ref}}} = \frac{i_i \; D_i}{1 + \frac{i_i \; D_i}{a_i}} \qquad (16)$$

Des transformations algébriques conduisent à:

$$Deq_i = \frac{i_i \; D_i}{i_{ref} + i_{ref} \; i_i \; D_i \left(\frac{1}{a_i} - \frac{1}{a_{ref}} \right)} \qquad (17)$$

L'équation peut être simplifiée en choisissant une espèce hypothétique comme référence avec les paramètres *i* et *a* tous deux égaux à 1. Cette supposition donne:

$$Deq_i = \frac{i_i \; D_i}{1 + i_i \; D_i \left(\frac{1}{a_i} - 1 \right)} \qquad (18)$$

L'addition des Deq des différentes espèces présentes donne la Densité équivalente total (Deqt):

$$Deq_t = \sum\nolimits_i Deq_i \qquad (19)$$

La perte de rendement de culture s'obtient de:

$$Y_L = \frac{Deq_t}{1 + Deq_t} \qquad (20)$$

Connaissant les indices *i* et *a* de chaque espèce de mauvaise herbe il est possible de calculer les dommages qui peuvent être causés par n'importe quelle combinaison de ces mauvaises herbes.

Méthodes de surface foliaire relative et taux de recouvrement relatif des mauvaises herbes
Si la compétitivité de l'infestation est évaluée par l'utilisation de L_w au lieu de la densité, l'équation qui exprime l'effet d'une population mixte devient plus simple. La formule qui est appliquée pour une seule espèce peut en fait être développée d'une façon additive, donnant la formule suivante:

$$Y_L = \frac{\sum_i q_i \, Lw_i}{1 + \sum_i \left(\frac{q_i}{m_i} - 1 \right) Lw_i} \qquad (21)$$

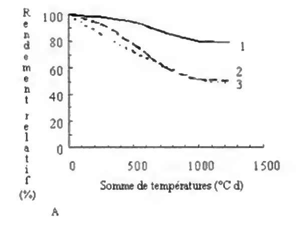
Où *qi*, *m*i et L_{wi} indiquent respectivement le coefficient relatif de dommage, la perte de rendement asymptotique et la valeur observée de L_w pour iéme espèce. Dans le cas où une valeur asymptotique maximum de perte de rendement n'est pas considérée, la valeur de m_i est égale à 1 pour toutes les espèces.

En utilisant RC au lieu de L_w comme variable descriptive de la compétition culture – mauvaises herbes, l'extension à une situation d'espèces multiples est simple. RC en soi mesure le ratio entre les projections horizontales des feuilles de la culture et celles de l'adventice, intégrant donc les effets de la surface foliaire et de la posture des feuilles de différentes espèces de mauvaises herbes. Ceci suppose que RC est d'une manière intrinsèque un descripteur d'espèces multiples. Les mesures prises au champ peuvent donc être directement utilisées (voir équation 8) pour estimer la perte de rendement causée par une infestation mixte de mauvaises herbes.

RELATIONS ENTRE LA PERTE DE RENDEMENT DE LA CULTURE ET LE TEMPS D'APPARITION ET D'ENLEVEMENT DE LA MAUVAISE HERBE

Etant donné l'importance de la première période de croissance (Sattin et Sartorato, 1997), la tendance de la relation entre la perte de rendement et le temps d'apparition et d'élimination des mauvaises herbes peut être facilement comprise. L'effet compétitif d'une densité donnée de mauvaises herbes apparaissant avec la culture dépend fortement de la longueur de la période passée dans le champ (c à d le temps d'élimination des mauvaises herbes). La relation entre la durée de la compétition et la réduction du rendement de la culture est approximativement sigmoïdale: les mauvaises herbes qui établissent la compétition pendant une courte période ont peu d'effet sur le rendement de la culture; en laissant les mauvaises herbes d'établir la compétition plus longtemps, la réduction de rendement augmente, jusqu'à ce qu'un plateau soit atteint correspondant à la perte de rendement causée par les mauvaises herbes qui développent la compétition pendant tout le cycle de croissance. Les cultures tels que le maïs et le soja montrent une période initiale relativement longue quand les dommages causés par les mauvaises herbes sont relativement bas, alors que la plupart des cultures horticoles sont plus sensibles, comme le montre la Figure 2.

Le rapport entre le temps d'apparition de la mauvaise herbe et la perte de rendement de la culture reflète les courbes dans la Figure 2. A. Bien attendu, ces rapports sont influencés par la densité de adventice: pour un temps spécifique d'apparition et d'enlèvement de adventice, plus la densité est élevé plus bas est le rendement relatif (Figure 2.B).



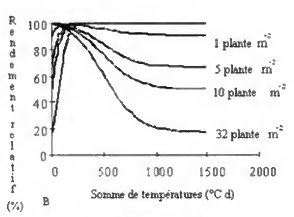


Figure 2.

A: Le rendement relatif de la culture, exprimé en pourcentage du test sans mauvaise herbe, comme une fonction de la durée de compétition (c à d le temps d'enlèvement de la mauvaise herbe) pour une densité de mauvaise herbe de 10 plantes m $^{-2}$. 1 = maïs en compétition avec *Abutilon theophrasti* (Sattin *et al.* 1992); 2 = soja en compétition avec *Amaranthus cruentus* (Berti *et al.* 1990); 3 = oignons en compétition avec *Helianthus annuus* (Dunan et al. 1995).

B: Le rendement relatif du soja, en pourcentage de test sans mauvaise herbe, en relation avec le temps d'émergence, le temps d'enlèvement et la densité de *Amaranthus cruentus* (Berti *et al.* 1990).

La relation entre la période d'émergence des mauvaises herbes et la perte de rendement reflète les courbes de la Figure 2A. Evidemment ces relations sont influencées par la densité de mauvaises herbes : pour une période spécifique d'émergence de mauvaises herbe ou d'enlèvement de mauvaise herbe, plus forte est la densité plus faible est le rendement relatif (Figure 2.B).
En étendant les concepts ci-dessus à une infestation mixte de mauvaises herbes qui peut être trouvée dans n'importe quel champ cultivé, le rendement peut être exprimé comme une fonction du rendement maximum de la culture réalisée sans mauvaises herbes, de la charge compétitive des mauvaises herbes et la période d'apparition et d'enlèvement des mauvaises herbes. Les deux premiers facteurs sont spécifiques au site, pendant que des données contradictoires rapportent la variabilité de la période sans mauvaises herbes (WFP) et la durée des courbes de compétition tolérée (DTC) pour différentes années et/ou localités. Les expérimentations conçues pour obtenir ce genre d'information sont ennuyeuses et très chères. Une question importante est donc de savoir comment ces données sont variables dans l'espace et dans le temps. En utilisant trois groupes de données qui montrent les effets d'infestations mixtes de mauvaises herbes dans le maïs, le soja et le blé dur au moyen de l'approche de Deq (Berti et Zanin, 1994), (Sattin *et al.* 1996) ont analysé la variabilité des courbes de DTC et WFP dans des zones raisonnablement homogènes en régions tempérées. En dépit des différences observées dans la flore de mauvaises herbes entre les expérimentations dans chaque groupe de données, l'allure de ces relations a l'air de dépendre plus des caractéristiques de la culture que de la composition de la flore de mauvaises herbes. Si ces résultats sont confirmés pour d'autres régions et cultures, alors pour une région donnée, la prédiction de perte de rendement causée par une infestation mixte de mauvaises herbes mixte à n'importe quelle période d'émergence et/ou d'enlèvement exigera la connaissance du rendement en situation sans mauvaise herbe, la relation charge compétitive de mauvaises herbes -pertes de rendement et seulement une série de paramètres (c à d une

beaucoup moins ennuyeux à obtenir comparativement à la détermination des relations entre DTC, WFP, la densité des mauvaises herbes et la perte de rendement de la culture.

PERIODE CRITIQUE ET TEMPS OPTIMUM D'APPLICATION POST-LEVÉE

La période critique a été définie comme la période au cours de laquelle les mauvaises herbes doivent être contrôlées pour éviter les pertes de rendement. Depuis que le concept de période critique a été introduit, il a été utilisé pour déterminer la période où les opérations de contrôle devraient être exécutées pour minimiser les pertes de rendement pour beaucoup de cultures (Zimdahl, 1988). Historiquement, les périodes critiques ont été calculées par la séparation des moyennes (ci-après désigné par approche classique) dans les expérimentations qui ont évalué l'impact du temps d'apparition et du temps d'enlèvement des mauvaises herbes sur les rendements des cultures. En utilisant l'approche classique, il est possible d'identifier une période au cours de laquelle aucune perte de rendement statistiquement détectable n'apparaît. Il fut aussi conclu que pour la plupart des cultures, il n'est pas nécessaire de contrôler les mauvaises herbes dans les toutes premières semaines après l'émergence de la culture et des mauvaises herbes (Zimdahl, 1988).

Plusieurs problèmes inhérents à l'approche classique ont été soulevés et l'utilisation d'analyse de régression (ci-après désigné par approche fonctionnelle) était suggérée comme une meilleure alternative. En passant de l'approche classique à l'approche fonctionnelle, l'existence d'une période où des mauvaises herbes ne causent aucune réduction de rendement est devenue douteuse à cause de la relation continue entre la perte de rendement et le temps d'apparition et d'enlèvement des mauvaises herbes. Pour éviter ce problème, des seuils de perte de rendement fixés étaient utilisés pour définir des périodes critiques (par exemple Van Acker *et al.* 1993). Dans ce cadre il fut conclu que le contrôle précoce des mauvaises herbes n'est pas nécessaire (Hall *et al.* 1992). Cette conclusion n'était pas le résultat d'une évaluation précise du moment où on doit commencer à contrôler les mauvaises herbes, mais de la façon dont les périodes critiques ont été calculées. L'approche fonctionnelle ne permet pas de tirer une telle conclusion puisqu'il y a une relation continue entre le rendement de la culture et le temps d'enlèvement des mauvaises herbes, contrôler les mauvaises herbes en pré-plantation ou pré-levée ou en post-levée ne peuvent être comparés sans considérer les pertes de rendement qui surviennent entre le semis et le contrôle post-levée.

L'établissement d'un seuil fixe de perte de rendement considère indirectement l'aspect économique dans le calcul des périodes critiques. Dans ce cadre, Dunan et al. (1995) ont développé une approche économique pour calculer la période critique. Ils ont défini la période critique économique comme l'intervalle de temps pendant lequel le revenu marginal de contrôle des mauvaises herbes est plus élevé que le coût du contrôle, et ses limites sont appelées les seuils précoces et tardifs de la période économique.

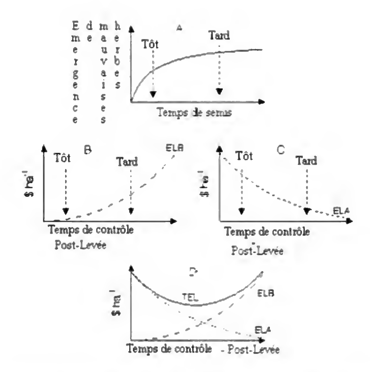


Figure 3. La représentation théorique du concept du temps optimum d'application pour les traitements post-levée.
(A) Allure hypothétique d'émergence des mauvaises herbes en fonction de temps après le semis de la culture.
(B) Perte économique résultat des mauvaises herbes émergeant avant le traitement post-levée (ELB).
(C) Perte économique résultat des mauvaises herbes émergeant après le traitement de post-levée (ELA); et
(D) Perte économique totale (TEL) en fonction de la période de contrôle. Précoce et tardif représentent deux différentes de contrôle post-levée des mauvaises herbes et on suppose que l'efficacité des traitements post-levée est de 100 %.

La période où le contrôle des mauvaises herbes peut être exécutée commence avant semis avec un contrôle tactique des mauvaises herbes et continue jusqu'au stade phénologique de la culture, qui exclut tout contrôle ultérieur de mauvaises herbes. Dans ce laps de temps les trois approches (classique, fonctionnelle et économique), toutes définissent une période où les mauvaises herbes devraient être contrôlées.

Cependant, l'identification d'une période à elle seule ne suffit pas ne fournit d'information ni sur le nombre, ni sur la période où les pratiques de contrôle devraient être réalisées. En considérant la dépendance du temps de l'effet compétitif des mauvaises herbes, les traitements qui sont réalisés dans cette période ne peuvent pas être considérés comme ayant la même marge nette (c à d la différence entre la valeur de la culture avec le contrôle moins le coût de traitement et la valeur de la culture sans contrôle) et par conséquent un temps optimum pour une ou plusieurs tactiques de contrôle des mauvaises herbes, existe et permet de réaliser la marge nette la plus élevée (Figure 3).

L'émergence des mauvaises herbes peut commencer au moment de la dernière préparation du lit de semis, puis continuer lorsque les conditions écologiques sont favorables pour le processus de germination. Comme précédemment montré, le temps d'apparition des mauvaises herbes affecte de beaucoup la compétitivité de celles-ci, les premières mauvaises herbes qui émergent étant beaucoup plus compétitives que les dernières. La plupart des traitements de post-levée ont une

activité résiduelle faible ou nulle. Pour cela ils peuvent contrôler la population des mauvaises herbes présentes au moment de leur application, mais ont peu ou pas d'effet sur les germinations ultérieures. L'effet économique des traitements de post-levée variera selon la période d'application et est lié à l'efficacité du traitement, des caractéristiques de la culture (les courbes WFP et DTC) et le mode de germination de mauvaises herbes.

En première approximation, la perte de rendement est donnée par la somme de la perte de rendement causée par les mauvaises herbes qui apparaissent avant le traitement (en compétition avec la culture jusqu'au traitement) et celle causée par les mauvaises herbes qui apparaissent après le traitement (en compétition, depuis leur émergence jusqu' à la récolte). Ces deux pertes de rendement suivent des tendances opposées (Fig. 3). Avec un traitement précoce, la perte causée par les mauvaises herbes présentes avant le traitement est faible parce que la durée de compétition est courte. Par contre, un nombre élevé de mauvaises herbes peuvent germer après le traitement et en restant jusqu'à la récolte, peuvent produire une perte importante de rendement. Avec un traitement tardif, les dommages causés par les mauvaises herbes qui émergent après le traitement sont réduits, mais il y a une augmentation marquée des dommages causés par les mauvaises herbes qui émergent avant le traitement. La somme de ces deux pertes donne une courbe de perte économique totale caractérisée par un minimum qui identifie le temps optimum de traitement (Berti *et al.* 1996). La figure 4 montre un exemple de ces calculs pour le maïs dans la vallée de Po en Italie et pour le soja dans le sud Ontario au Canada (Sattin *et al.* 1996). Les courbes ont été calculées en utilisant l'approche de Temps de Densité Equivalente (« Time Density Equivalent ») (TDE - Berti *et al.* 1996) et les relations DTC et WFP calculées par Sattin *et al.* (1996) ont été utilisées. Avec l'approche TDE, la population des mauvaises herbes est divisée en cohortes quotidiennes en fonction de leur temps d'émergence. Pour chaque cohorte le TDE est égal à la densité d'une cohorte de mauvaises herbes qui émergent avec la culture et développe la compétition jusqu' à la récolte, provoquant la même perte de rendement que la cohorte considérée. Les TDEs peuvent être considérés comme additifs et leur somme est le Temps Total Densité Equivalente (TTDE), qui donne une bonne estimation de la compétitivité de la population de mauvaises herbes selon la structure d'émergence et, considérant l'efficacité de l'herbicide, sur le temps de traitement. La relation entre le temps de contrôle des mauvaises herbes et la marge nette dépend de la structure d'émergence de mauvaises herbes et de la compétitivité de la culture.

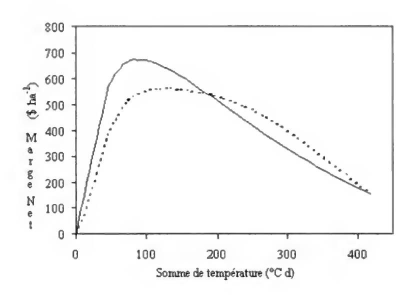


Figure 4. Relations entre la période d'application d'un traitement post-levée et la marge nette pour maïs et le soja. Maïs: rendement sans mauvaise herbe = 10 t / ha coût du traitement post-levée = 45$ /ha ; prix du grain = 155$ /t. Soja : rendement sans mauvaise herbe = 4 t /ha ; coût du traitement post-levée = 45$ / ha; prix du grain = 250$ / t. Pour les deux cultures l'infestation de mauvaises herbes capable de causer une perte de rendement de 50 % en l'absence de traitement était considérée.

PROBLEME D'EVALUATION DE LA PRESSION DES MAUVAISES HERBES

Les approches ci-dessus présentées permettraient de décider s'il faut traiter, comment et quand traiter. Evidemment ceci exige quelques connaissances sur la composition quantitative et qualitative de la flore de mauvaises herbes. Selon l'approche utilisée, différentes mesures devraient être prises (c à d. la densité des mauvaises herbes, LAI de la mauvaise herbe et de la culture, la couverture relative). Cette phase de reconnaissance est cruciale: il est clair que plus le niveau de précision est élevé mieux cela vaut, étant donné que c'est la base pour les calculs ultérieurs et pour la sélection de l'option de contrôle de mauvaises herbes à adopter; par contre, la reconnaissance exige du temps et représente un coût, diminuant ainsi la marge nette du contrôle des mauvaises herbes. De plus, les mauvaises herbes ont d'habitude une distribution inégale dans les champs et ceci exige des techniques d'échantillonnage qui en tiennent compte. Pour le dénombrement des mauvaises herbes, Berti *et al.* (1992) ont proposé une méthode d'échantillonnage relativement facile. L'échantillonnage est fait en lançant un cadre de métal (25 x 30 cm) au hasard ; les plantes présentes dans le rectangle sont comptées et classées par espèce. En se basant sur des études antérieures (Berti *et al.* 1992), il a été prouvé que 20-30 lancers sont suffisants pour garantir une bonne estimation de la densité des mauvaises herbes, en supposant que l'infestation est relativement homogène; si non des sous-échantillons devraient être pris. Le temps requis pour ce type de reconnaissance est d'environ 20 minutes par hectare quand il est fait par un personnel bien-entraîné, mais peut être plus du double avec des gens moins talentueux (Berti *et al.* 2002). Le temps requis et le besoin de personnel spécialisé peuvent devenir un problème majeur dans l'application de Systèmes de Soutien à la Décision (DSS) au champ, surtout dans les pays en développement.

D'autres approches ont été proposées qui sont basées sur les estimations visuelles de la pression des mauvaises herbes. Aux États Unis, Harvey et Wagner (1994) ont utilisé une estimation visuelle de la pression des mauvaises herbes pour estimer la perte de rendement de culture. La pression des mauvaises herbes se définit comme étant l'estimation visuelle du pourcentage dont les mauvaises herbes contribuent au volume total et de la culture et des mauvaises herbes dans une parcelle, avec une valeur 0 indiquant l'absence totale de mauvaises herbes et 100 indiquant l'absence complète de culture. Un problème courant avec ce type d'approche est la variabilité élevée du taux assigné par différents personnels pour le même niveau d'infestation, conduisant à une incertitude d'estimation des pertes de rendement, particulièrement avec de faibles niveaux d'infestation, qui représente, d'autre part, la situation où l'usage d'un DSS est plus utile. Une autre contrainte est que l'estimation visuelle de la pression des mauvaises herbes est facilement réalisable quand la culture et les mauvaises herbes ont atteint déjà une étape de développement avancée, alors qu'il est très difficile de donner une évaluation exacte lorsque les plantes sont au stade de jeunes pousses. Ceci pose des limites à l'utilité de cette approche pour la sélection des mesures de contrôle de l'adventice de l'année en cours, mais elle pourrait être utilisée pour prédire les futures pertes de rendement de culture dans le même champ afin d'aider à une prise de décisions judicieuses de gestion des mauvaises herbes pour l'année suivante (Harvey et Wagner, 1994).

Par conséquent, à l'heure actuelle l'utilisation des DSS pour choisir les mesures de contrôle des mauvaises herbes est confrontée à un paradoxe: ils sont surtout utiles pour les paysans moins expérimentés, parce qu'ils peuvent considérablement améliorer leurs techniques de gestion, pendant que des gens plus expérimentés peuvent normalement choisir la mesure appropriée de contrôle à partir de leur propre expérience. D'autre part, pour être fait d'une manière rapide et fiable, pour ne pas enregistrer une augmentation excessive des coûts de contrôle, une évaluation réelle de la pression compétitive des mauvaises herbes exige un niveau de connaissance relativement élevé.

CONCLUSIONS

L'usage de modèles qui prennent en compte la densité des mauvaises herbes ou autres variables indépendantes exprimant la compétitivité des mauvaises herbes peut considérablement améliorer la procédure de sélection du type de contrôle des mauvaises herbes, avec un grand impact aussi sur le rendement que sur l'aspect économique. Cependant, les applications de DSS dérivées de ces modèles de compétition sont, jusqu'ici, relativement limitées, principalement parce que l'usage de DSS exige un niveau de connaissance relativement élevé pour être vraiment efficace.

La vaste littérature sur ce sujet montre que le début du cycle de croissance est crucial dans la détermination de l'intensité et le résultat de la compétition ultérieure mauvaises herbes-culture. Il apparaît aussi que dans les climats plus chauds où le cycle de croissance des cultures est souvent plus court, comme c'est le cas dans beaucoup de pays en développement, l'importance de compétition précoce mauvaises herbes-culture est accentuée (Mohamed *et al.* 1997). Le temps relatif d'émergence des mauvaises herbes et de la culture est crucial et peut prendre le dessus sur beaucoup d'autres facteurs: une différence de quelques jours dans l'émergence peut créer un écart irrécupérable entre plantes, et donc toute pratique agricole qui retarde l'apparition des mauvaises herbes et favorise un établissement satisfaisant de la culture, joue un rôle important. Il y a des indications que la variabilité (dans l'espace et dans le temps) de perte de rendement causée par les infestations mixtes de mauvaises herbes peut être relativement faible. Donc, si ces résultats sont confirmés pour des zones différentes, pour diverses cultures et pour une région raisonnablement homogène, seulement quelques expérimentations sommaires, même si elles sont à forte intensité de main-d'oeuvre, sont nécessaires pour prévenir la perte de rendement en relation avec WFP, DTC et la densité de mauvaises herbes.

Ce type d'information pourrait donner des indications utiles et fournir un cadre, particulièrement dans des situations où le niveau technologique est bas (par exemple là où le contrôle manuel de mauvaises herbes est courant), et donc où les règles simples pour diriger le contrôle de mauvaise herbe ont plus de chance d'être adoptées que des technologies informatiques plus compliquées. Il serait donc très utile d'avoir, au moins pour les zones agricoles et les cultures les plus importantes, quelques séries de données fondamentales en ce qui concerne la compétitivité mauvaises herbes - culture, la période de compétition des mauvaises herbes et les conditions climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

Akobundu, O. 1996. Principles and prospects for integrated weed management in developing countries. *Proc. of the Second Int. Weed Control Congress*, Copenhagen. pp. 591-600.

Akobundu, O. 1998. Basic elements for improved weed management in the developing world. In *Report of the Expert Consultation on Weed Ecology and Management.* pp. 93-101. FAO, Rome.

Berti, A. & Zanin, G. 1994. Density equivalent: a method for forecasting yield loss caused by mixed weed populations. *Weed Res.* 34: 327-332.

Berti, A. & Sattin, M. 1996. Effect of weed position on yield loss in soybean and a comparison between relative weed cover and other regression models. *Weed Res.* 36: 249-258.

Berti A., Sattin, M. & Zanin, G. 1990. Soybean-Amaranthus cruentus L.: effects of the period of duration of competition. *Proc. First Congress of the European Society of Agronomy,* Paris, Session 5: P01.

Berti A., Bravin, F. & Zanin G. 2002. Application of a farm decision-support system for post- emergence weed control. *Weed Sci.* (in press).

Berti A., Dunan, C.M., Sattin, M., Zanin, G. & Westra, P. 1996. A new approach to determine when to control weeds. *Weed Sci.* 44: 496-503.

Berti, A., Zanin, G., Baldoni, G., Grignani, C., Mazzoncini, M., Montemurro, P., Tei, F., Vazzana, C. & Viggiani, P. 1992. Frequency distribution of weed counts and applicability of a sequential sampling method to integrated weed management. *Weed Res.* 32: 39-44.

Cousens, R., Brain, P., O'Donovan, J. T. & O' Sullivan, P. A. 1987. The use of biologically realistic equations to describe the effect of weed density and relative time of emergence on crop yield. *Weed Sci.* 35: 720-725.

Cousens, R.D. 1985a. A simple model relating yield loss to weed density. *Annals Applied Biology* 107: 239-252.

Cousens, R.D. 1985b. An empirical model relating crop yield to weed and crop density and a statistical comparison with other models. *J. of Agricultural Sci.* 105: 513-521.

Doll, J.D. 1994. Dynamics and complexity of weed competition. *In* Labrada R., Caseley, J.C. & Parker, C., eds. *Weed Management for Developing Countries*, pp. 29-34. FAO, Rome.

Dunan, C.M., Westra, P., Schweizer, E.E., Lybecker, D. & Moore, F.D. 1995. The concept and application of early economic period tRHeshold: the case of DCPA in onions (*Allium cepa*). *Weed Sci.* 43: 634-639.

Ellis-Jones J., Twomlow, S., Willcocks, T., Riches, C., Dhliwayo, H. & Mudhara, M. 1993. Conservation labourage/weed control systems for communal farming areas in semi-arid Zimbabwe. *Brighton Crop Protection Conference – Weeds*, Vol. 3: 1161-1166.

Forcella F. 1998. Application of weed seed bank ecology to weed management. In *Report of the expert consultation on weed ecology and management.* pp. 23-35. FAO, Rome.

Forcella, F., Wilson, R.G., Dekker, J., Kremer, R.J., Cardina, J., Anderson, R.L., Alm D., Renner, K.A., Harvey, R.G., Clay, S. & Buhler, D.D. 1997. Weed seedbank emergence across the corn belt. *Weed Sci.* 45: 47-76.

Hall, M.R., Swanton, C.J. & Anderson, G. 1992. The critical period of weed control in grain corn (*Zea mays*). *Weed Sci.* 40: 441-447.

Harvey, R.G. & Wagner, C.R. 1994. Using estimates of weed pressure to establish crop yield loss equations. *Weed Tech.* 8: 114-118.

Kropff, M.J., Lotz, L.A.P., Weaver, S.E., Bos, H.J., Wallinga, J. & Migo, T. 1995. A two-parameter model for prediction of crop loss by weed competition from early observations of relative area of weeds. *Annals of Applied Biology* 126: 329-346.

Kropff, M.J. 1988. Modelling the effects of weeds on crop production. *Weed Res.*28: 465-71

Kropff, M.J. and Spitters C.J.T. 1991. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative area of the weeds. *Weed Res.*31: 97-105.

Labrada R. 1996. Weed management status in developing countries. *Proc. of the Second Int. Weed Control Congress,* Copenhagen. pp. 579-589.

Labrada R. 1998. Problems related to the development of weed management in the developing world. In *Report of the Expert Consultation on Weed Ecology and Management.* pp.7-12. FAO, Rome.

Labrada R. & Parker C. 1994. Weed control in the context of integrated pest management. *In* Labrada, R., Caseley, J.C. and Parker, C., eds. *Weed Management for Developing Countries.* pp. 3-26. FAO, Rome.

Lutman, P.J.W. 1992. Prediction of the competitive effects of weeds on the yields of several spring-sown arable crops. *IXème Colloque Int. sur la Biologie des Mauvaises Herbes*, Dijon, France: ANPP. pp. 337-45.

Maskey, R.K. 1997. Sustainable agricultural development in less developed countries. *Outlook on Agriculture* 26: 39-45.

Mohamed, E.S., Nourai, A.H., Mohamed, G.E., Mohamed, M.I. & Saxena, M.C. 1997. Weeds and weed management in irrigated lentil in northern Sudan. *Weed Res.* 37: 211-218.

Pike D.R., Stoller, E.W. & Wax L.M. 1990. Modeling soybean growth and canopy apportionment in weed-soybean (Glycine max) competition. *Weed Sci.* 38: 522-7.

Sattin, M, Zanin, G. & Berti, A. 1992. Case history for weed competition/population ecology: velvetleaf (*Abutilon theopRHasti*) in corn (*Zea mays*). *Weed Tech:* 6: 213-219.

Sattin, M. & Sartorato, I. 1997. Role of seedling growth on weed-crop competition. *Proc. of 10th EWRS (European Weed Research Society) Symposium*, Poznan, Poland. pp. 3-12.

Sattin, M., Berti, A. & Zanin, G. 1996. Crop yield loss in relation to weed time of emergence and removal: analysis of the variability with mixed infestations. *Proc. of the Second Int. Weed Control Congress*, Copenhagen. pp. 67-72.

Van Acker, R.C., Swanton, C.J. & Weise, S.F. 1993. The critical period of weed control in soybeans. *Weed Sci.* 41: 194-200. (Ph.D. thesis)

Vleeshouwers, L.M. 1997. *Modelling weed emergence pattern.* Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

Wilkerson, G.G., Modena, S.A. & Coble, H.D., 1991. HERB: Decision model for post-emergence weed control in soybean. *Agronomy J.* 83: 413-417.

Zimdahl, R. L. 1988. The concept and application of the critical weed-free period. *In* Altieri, M.A. & Liebmann, M., eds. *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches.* pp. 145-155. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Directives pour l'évaluation du risque des mauvaises herbes dans les pays en développement

Peter A. Williams

INTRODUCTION

La circulation d'articles de commerce et l'aide d'un genre ou d'un autre à travers le monde est essentielle pour le bien-être de toutes les nations. Cependant, tous ces articles et dons ne sont pas bienfaisants, et quelques-uns arrivent avec des surprises indésirables. Les espèces envahissantes affectent les systèmes agricoles et autres, et leurs impacts viennent en seconde position après la destruction de l'habitat en ce qui concerne la perte de biodiversité. Ces inquiétudes ont engendré l'intérêt international grandissant pour les systèmes d'évaluation de risque des mauvaises herbes pour empêcher l'introduction de nouveaux organismes nuisibles et donner la priorité au contrôle des organismes nuisibles existants. L'évaluation de risque des mauvaises herbes est une nouvelle discipline, et le premier colloque international sur le sujet a seulement eu lieu, récemment, en Australie Groves *et al.* 2001). Ce pays, de concert avec la Nouvelle Zélande, est au premier rang pour le développement et pour l'exécution de protocoles éprouvés de mise en quarantaine. Les deux pays sont relativement isolés du reste du monde, l'agriculture est importante pour leurs économies, et leurs citoyens accordent de l'importance aux paysages naturels et leur ancienne biodiversité indigène.

Ce rapport introduit le sujet d'évaluation de risque de mauvaises herbes et donne des directives pour les pays qui souhaiteraient renforcer leurs propres protocoles de mise en quarantaine et utiliser les ressources rares efficacement pour donner les priorités au contrôle des organismes nuisibles existantes. Heureusement, cette tâche devient plus facile parce que l'Internet permet l'échange rapide d'information et l'accès à des bases de données détaillées sur les organismes nuisibles, par exemple le compendium mondial des mauvaises herbes (http://www.hear.org).

CADRE INTERNATIONAL D'EVALUATION DE RISQUE DE MAUVAISES HERBES

Les actions prises pour exclure une espèce de plante d'un pays à cause de sa nuisance potentielle doivent être conforme aux normes internationales qui réglementent la circulation d'articles de commerce. Ces obligations sont définies conformément à l'Accord sur l'Application des Mesures Sanitaires et Phytosanitaires (Accord SPS) de l'Organisation Mondiale du Commerce. (OMC 1994), et la Convention International de Protection des Végétaux (CIPP) (1997 édition révisée) dont l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture est le dépositaire (FAO, 1996). Ces deux accords internationaux, en même temps qu'ils permettent aux pays de spécifier les conditions requises pour l'entrée de matériel végétal, précisent les obligations des pays pour que ces exigences d'importation ne soient pas des barrières commerciales injustifiées.

Une convention internationale supplémentaire traitant des mauvaises herbes concerne le besoin de préserver la biodiversité. L'article 8 (h) de la Convention sur la Diversité Biologiques stipule: "Chaque Partie contractante doit, aussi longtemps que possible et approprié, empêcher l'introduction, contrôler ou éradiquer ces espèces étrangères qui menacent les écosystèmes, les habitats, ou les espèces."Tous les pays ne sont pas signataires de cette convention.

Un organisme nuisible de quarantaine[1] est définie par le CIPP, *comme étant un organisme nuisible d'importance économique potentielle dans une région ainsi mise en danger et qui n'y est pas encore présente ou est présente mais pas largement répandue et étant officiellement contrôlée (FAO*, 2001a). Il est admis dans ce rapport, que le terme *'Importance économique'* inclut des effets actuels ou potentiels sur l'économie des écosystèmes et les espèces qui les composent, et que la définition du CIPP pour un organisme nuisible est suffisamment large pour inclure les mauvaises herbes couvrant toute la gamme des écosystèmes, y compris celles couvertes par la Convention sur la Diversité Biologique (CDB 2001). En fait, des rencontres internationales ont été récemment tenues pour encourager la collaboration entre le CIPP et le CDB (par exemple, Bangkok, 6-8 février, 2001).

L'Analyse du Risque de phytosanitaire (PRA) est *un processus* à trois étapes *pour évaluer l'évidence biologique ou autre évidence scientifique et économique afin de déterminer si un organisme nuisible devrait être réglementé et la force et l'efficacité des mesures phytosanitaires à prendre à son encontre* (FAO, 2001b).

Ces étapes sont:

> **Etape 1.** Initier le processus en identifiant un organisme nuisible qui peut être qualifiée *d'un organisme nuisible de quarantaine*, et/ou les voies qui peuvent permettre l'introduction ou la diffusion *d'un organisme nuisible de quarantaine*, qui devraient être pris en compte pour l'analyse du risque phytosanitaire dans une région définie pour l'PRA.
>
> **Etape 2.** Evaluer le risque d'organisme nuisible en déterminant quel (s) organisme (s) est/sont considérés comme *organismes nuisibles de quarantaine*, et en caractérisant la probabilité *d'entrée, d'établissement, de diffusion*, et l'importance économique.
>
> **Etape 3.** Gérer le risque d'*organisme nuisible* identifié à l'Etape 2 par le développement, l'évaluation, la comparaison, et la sélection des options pour gérer le risque.

Les étapes initiales sont la détermination de la porte ou des portes d'entrée, c'est-à-dire tout moyen qui permet l'entrée ou la diffusion d'un organisme nuisible, et de identifier correctement l'organisme nuisible. L'identification des voies d'entrée à haut risque est une partie importante du processus général d'évaluation de risque de mauvaises herbes, mais ce rapport traite seulement des organismes nuisibles individuels.

Les critères utilisés pour déterminer la présence ou l'absence d'un organisme potentiel de quarantaine dans une région sont représentés dans un diagramme de flux à la Figure 1, reproduit à partir de la norme de la CIPP, Directives pour l'evaluation du risque d'organismes nuisibles (FAO 1996). *La région est définie comme étant un pays avec des limites officiels définies, une partie d'un pays, plusieurs pays ou parties de pays* (FAO, 2001a). Si l'espèce est absente, et a une importance économique potentielle, elle peut être considérée comme un *organisme nuisible de quarantaine*. Si elle est déjà présente dans une région, alors elle peut être légitimement considérée comme *un organisme nuisible de quarantaine* et évaluée pour

---

[1] Les termes in italiques sont les définitions et les directrives qui se trouvent dans les publications de la FAO. Références sont faites publications récentes où ces définitions sont expliquées, et non pas nécessairement à l'accord original. Ils sont disponibles sur internet.

voir si sa distribution est limitée ou si elle est officiellement sous contrôle. *Officiel* se définit comme *établi, autorisé*, ou *exécuté par une agence nationale de protection des végétaux*, et *control* est défini comme *suppression, confinement, ou éradication d'une population d'un organisme nuisible* (FAO, 2001a).

Un organisme nuisible capable de *diffusion ultérieure*, c'est-à-dire *l'expansion de la distribution géographique dans une région donnée* (FAO, 2001a), (Figure 1) qui n'est pas contrôlé, exigerait d'être mis sous contrôle pour justifier un statut d'*organisme nuisible de quarantaine*. Les espèces qui sont contrôlées mais qui sont dans les limites absolues de leur distribution potentielle ne peuvent plus étendre leur aire de *distribution* et ainsi ne peuvent non plus être déclarées *organismes nuisibles de quarantaine*. En réalité, la plupart des espèces exotiques dans la plupart des pays peuvent potentiellement étendre leur aire de distribution.

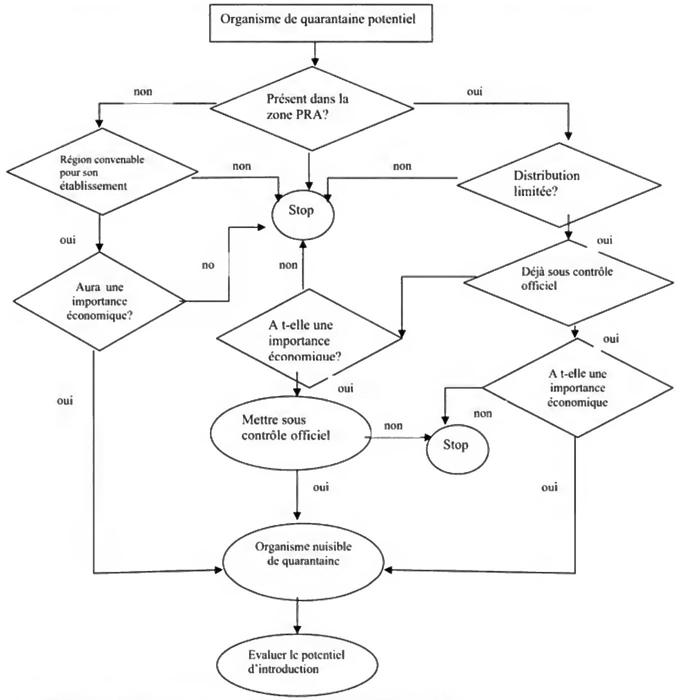


Figure 1. Analyse des risques d'un organisme nuisible (Source FAO, 1996).

Une fois que le statut d'*organisme nuisible de quarantaine* a été confirmé, l'étape suivante est d'évaluer l'importance économique (y compris l'environnement) de l'espèce. Ceci peut être élevé pour un organisme nuisible.

L'évaluation de risque de mauvaises herbes concerne principalement les deux premières étapes de *l'évaluation de risque d'organisme nuisible y compris la catégorisation des organismes nuisibles, c'est-à-dire le processus pour déterminer si un organisme nuisible a, ou n'a pas, les caractéristiques d'un organisme nuisible de quarantaine ou celle d'un organisme nuisible sous contrôle* sans être de quarantaine (FAO, 2001a). La condition minimum requise pour tout système d'évaluation de risque de mauvaises herbes est qu'il satisfasse les accords internationaux mis en exergue dans la Section 2. Pour ce faire il doit être basé sur les suppositions explicites et utiliser des données scientifiques.

Des systèmes d'évaluation de risque de mauvaise herbe conçus seulement pour utilisation dans un seul état souverain, et qui n'a pas le potentiel pour limiter le commerce, n'a pas besoin de se conformer aux accords internationaux. Mais, pour être efficaces, ils doivent être basés sur des principes similaires.

PROCESSUS D'INVASIONS DES PLANTES

Des espèces de plante doivent traverser une série de barrières pour atteindre une nouvelle région et s'y diffuser. Au début, celles-ci sont des barrières physiques sur une échelle intercontinentale et/ou intracontinentale. Des espèces qui n'ont pas traversé ces barrières peuvent être néanmoins classées comme des organismes nuisibles de quarantaine, principalement en se basant sur leur histoire d'organisme nuisible ailleurs. Une fois qu'elles ont atteint la nouvelle région, elles doivent surmonter un certain nombre de barrières abiotiques et biotiques avant leur établissement. Les activités humaines sont importantes pour aider les espèces à traverser ces barrières. Les espèces qui arrivent accidentellement en petit nombre a une chance relativement faible pour s'établir. Par contre, les espèces qui se propagent par contamination de semences, cultivées pour horticulture en grand nombre dans un environnement protégé, ou cultivées dans des environnements agricoles ou naturels, par exemple étant que cultures ou pour le contrôle de l'érosion, ont plus de chance de s'établir. Une fois qu'une espèce est cultivée dans un nouveau pays elle peut de façon intermittente apparaître dans le milieu sauvage au delà des plantations initiales. Si elle était occasionnellement introduite comme un contaminant de culture elle peut apparaître sur la aux mêmes endroits. Le terme pour de telles observations est espèce étrangère occasionnelle ou espèce exotique occasionnelle. Pour devenir une espèce étrangère acclimatée ou une espèce étrangère entièrement acclimaté ou exotique selon la définition suivie, une espèce doit alors développer des populations qui se maintenant dans le milieu sauvage. Ces lieux sont les points à partir desquels elle peut se propager dans la région.

Les caractéristiques différentes et les étapes du cycle de vie des espèces (Figure 2) peuvent être importantes aux différentes barrières. Par exemple, les fleurs très colorées peuvent être en premier lieu le critère de sélection pour le transport transcontinental. Une reproduction rapide par semences et/ou organe végétatif (par exemple, bulbes et tubercules) (Figure 2) peut alors aider à sa propagation une fois qu'elle a été introduite. Sa persistance à travers des périodes climatiques défavorable peut dépendre de la longévité de sa banque de semences. La traversée de ces séries de barrières est réversible. Une espèce peut être localement extirpée ou même être poussée à l'extinction dans une région, si, par exemple, il y a des variations climatiques

sévères ou si de nouveaux prédateurs et maladies sont introduits. Le processus d'introduction et d'extinction par les moyens naturels ou par contrôle peut être répété pendant plusieurs années jusqu'à ce que finalement l'espèce devienne entièrement acclimatée.

La dispersion d'un organisme nuisible peut suivre un nombre de modalités dans le temps et dans l'espace, dépendant des facteurs tels que ses moyens de dispersion, son cycle de vie, et ainsi de suite. Beaucoup suivent un mode simplifié de forme 'S' (Figure 3, ligne continue), qui peut être illustré graphiquement comme étant la proportion de l'habitat potentiel occupée par l' organisme nuisible à n'importe quel moment. Les caractéristiques essentielles sont une longue queue au commencement de la courbe de dispersion d'une espèce puisqu'en ce moment elle traverse les premières séries de barrières, une ascension escarpée lorsqu'elle traverse ces barrières et trouve des habitats convenables, et ensuite un plafonnement lorsque ces habitats sont saturés. Lorsque l'organisme nuisible se propage, la proportion des habitats non infestés décline à un taux défini par une courbe 'S inversée' (Figure 3, ligne pointillée). Le processus de dispersion peut être continu, mais des points sont toujours reconnaissables (d'habitude seulement avec expérience) là où la vitesse tranche nettement avec celle de la période précédente. A des fins de gestion la forme 'S' peut être idéalisée comme des étapes basées sur l'extinction et le taux de diffusion. Ce concept peut être appliqué à toute échelle géographique, d'une région à un continent.

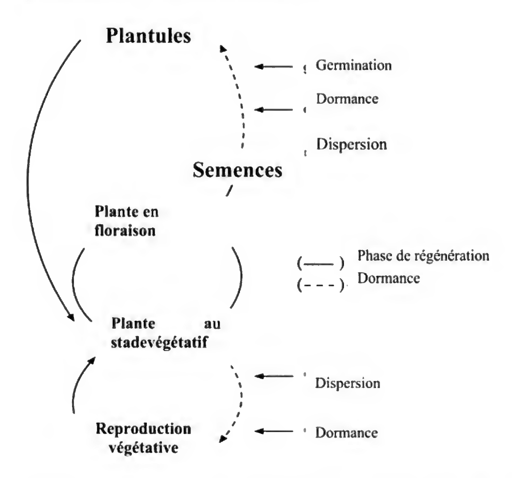


Figure 2. Le cycle de vie des plantes pérennes produisant aussi bien des semences que des organes de multiplication végétative (de Williams, 1997).

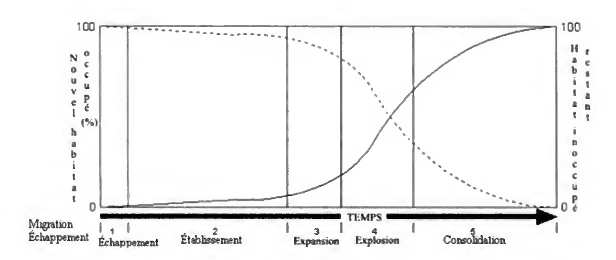


Figure 3. Phases conceptuelles d'invasion progressive d'une mauvaise herbe dans le temps, et la relation avec le pourcentage de terre occupée et non occupée (de Williams, 1997).

PHASES CONCEPTUELLES DE L'INVASION D'UNE MAUVAISE HERBE

Phase de migration

L'espèce doit atteindre premièrement la limite de la zone. Une fois qu'elle y est arrivée, elle peut, ou peut ne pas, entrer, ce qui dépende différents facteurs. Là où il y a des protocoles efficaces de quarantaine et des procédures de gestion de risque elle sera détectée et, si possible, éliminée, si elle est un organisme nuisible de quarantaine.

Phase d'échappement

Une fois dans la zone elle peut ne s'échapper qu'occasionnellement, ou finalement devenir entièrement acclimatée. Les sites de ces points d'acclimatation sont probablement associés à la voie d'introduction, par exemple dans les champs de maïs contaminés, ou adjacents aux plantations destinées au contrôle de l'érosion. Ils sont désignés sous l 'appellation ' sites sentinelles.'

Phase d'établissement

Pendant cette phase, la plante peut se reproduire dans le nouvel environnement, et la population commence lentement à se développer. Virtuellement tout habitat potentiel est encore non infecté.

Phase d'expansion

Finalement, le nombre de sites occupés s'étend au delà des sites initiaux. L'expansion est plus rapide là où il y a plusieurs sites initiaux. Les causes de cette expansion diffèrent selon les espèces et ne sont pas bien connues. Les facteurs sont divers, y compris les saisons de croissance particulièrement favorables, l'arrivée de nouveaux pollinisateurs ou d'agents de dispersion, l'espèce s'adaptant à son nouvel environnement par la formation de nouveaux

dispersion, l'espèce s'adaptant à son nouvel environnement par la formation de nouveaux génotypes. De nouveaux habitats peuvent être créés, par exemple, par des changements dans l'utilisation de la terre.
Quelques endroits localisés de l'habitat deviennent remarquablement infestés, mais la majeure partie de l'habitat potentiel n'est pas encore infestée. Bien souvent c'est seulement à cette étape que la plante commence à être perçue comme un organisme nuisible.

Phase d'explosion

C'est la période où l'aire occupée par l'organisme nuisible s'étend rapidement et souvent il commence à faire l'objet d'inquiétude officielle. Beaucoup d'habitats potentiels sont infestés pendant cette phase.

Phase de retranchement

L'aire de l'organisme nuisible s'étend lentement aux derniers habitats qui restent pour couvrir la totalité de son aire de distribution dans la zone. Ceci ne signifie pas que l'espèce se rencontre sur toute terre propice à tout moment, mais que la probabilité que cela arrive est élevée.

Une plus large distribution peut seulement se produire si un habitat plus propice est créé, par exemple par le feu. Il est important de noter que l'organisme nuisible peut être seulement présent dans un état de dormance, comme le montre la Figure 2.

Ces changements potentiels dans la diffusion d'un organisme nuisible ont des implications pour des impératifs d'évaluation de risque de mauvaises herbes:

- Le moyen efficace le moins coûteux pour éviter les impacts des organismes nuisibles est d'empêcher leur introduction ou leur établissement dans une zone. A défaut de cela, il est beaucoup plus rentable de contrôler un organisme nuisible avant qu'il ne répande.
- Une fois qu'elle s'est établie et a commencé à s'étendre, l'effort permanent exigé pour l'éliminer augmente de façon dramatique (Figure 4).
- Pendant les premières phases de diffusion, quand les fonds exigés pour extirper un organisme nuisible sont bas, ceux-ci peuvent être efficacement obtenus comme un complément à d'autres programmes de contrôle d'organismes nuisibles. Une fois que les organismes nuisibles commencent à s'étendre rapidement, l'effort requis pour obtenir les fonds peut être beaucoup plus élevé. Dit d'une autre façon, , tout au début seulement la personne avec le pulvérisateur (ou la bêche ou la manchette) a besoin d'être persuadée pour agir, pendant que plus tard, cela pourrait nécessiter l'approbation du gouvernement.
- De par le monde il n'y a pas eu de tentatives d'éradication de mauvaises herbes qui aient réussi (A, Figure 4) si ce n'est dans des cas où l'organisme nuisible n'a couvert s que quelques hectares. Les espèces à semences persistantes ou autres organes de régénération qui exige des visites répétées du site (s) sont particulièrement intransigeantes.
- Les coûts totaux accumulés au fil du temps sont l'effort exigé pour obtenir des fonds, l'argent dépensé sur le contrôle actuel, plus les impacts sur l'économie et l'environnement. Ces coûts accumulés deviennent progressivement plus élevés avec le

- Les systèmes efficaces d'évaluation de risque de mauvaises herbes doivent être en mesure d'apprécier: si ou non un organisme nuisible s'est établi et propagé; la biologie et l'écologie de l'organisme nuisible ; les valeurs qui sont menacées; dans quelle mesure l'organisme nuisible s'est-il ou non établi dans une région; les technologies et les ressources disponibles.

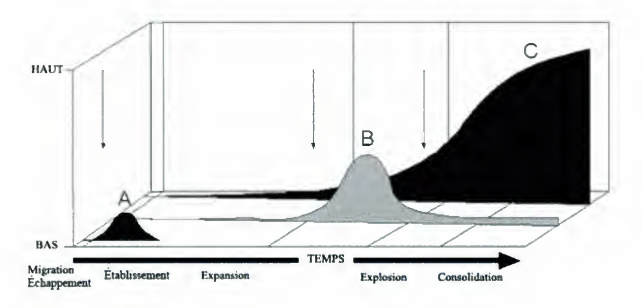


Figure 4. Coûts relatifs monétaires et environnementaux combinés pour entreprendre un programme d'éradication (A), ensemble avec ceux d'initiation du programme de contrôle à la première étape (B) et la dernière étape (C) de l'invasion. Les flèches indiquent les points de démarrage du programme. Les différences dans la partie en dessous des courbes (B-A, C-A, C-B) représentent le bénéfice d'une action de contrôle à la première étape (de Williams, 1997).

Les trois facteurs importants changent quand un organisme nuisible traverse les diverses barrières:

a) la localité et la masse d'information. Avant qu'une espèce ne soit introduite dans une région, toute information requise pour entreprendre la catégorisation de l'organisme nuisible sera recueillie de la connaissance de l'espèce hors de la nouvelle région. Dans la plupart des cas, ceci signifie qu'on obtienne l'information de son pays d'origine et d'ailleurs. La qualité et la masse d'informations dépendront de ce que l'espèce a une histoire en tant qu'organisme nuisible, ou peut être en tant que plante cultivée ou plante ornementale. Une fois qu'une espèce a été introduite, beaucoup d'informations peuvent être obtenu, particulièrement sur sa croissance et sa biologie reproductive. Cependant, c'est seulement lorsqu'elle se propage, que sa tolérance et son impacts environnementaux dans la nouvelle région seront révélés.

b) La certitude d'une bonne évaluation. Résultant de cette information croissante lorsque l'organisme nuisible se propage, la fiabilité d'une évaluation de risque de mauvaises herbes augmente, et réciproquement, la probabilité que l'évaluation soit mauvaise, diminue.

C) L'identification de ceux qui sont affectés. Les écosystèmes sur lesquels un organisme nuisible pourrait avoir d'impact ne peuvent pas être prédits efficacement avant qu'elle n'ait

C) L'identification de ceux qui sont affectés. Les écosystèmes sur lesquels un organisme nuisible pourrait avoir d'impact ne peuvent pas être prédits efficacement avant qu'elle n'ait commencé à s'étendre. Ainsi, ni les individus ni les groupes d'intérêt directement affectés par les impacts potentiels ne peuvent être identifiés. Au fur et à mesure qu'un organisme nuisible se propage à travers ses habitats potentiels et son champ d'action (Figure 3), ceux qui sont affectés deviennent de plus en plus identifiables. Le corollaire de cette situation est que ceux-là qui vont en toute probabilité profiter de la gestion de l'organisme nuisible devient de plus en plus identifiables. Cela signifie d'une part que, tous ceux qui sont dans la région bénéficient potentiellement de la détection d'un organisme nuisible de quarantaine qui n'a pas encore atteint. D'autre part, seulement ceux dont l'organisme nuisible occupe les terres bénéficient directement du contrôle local d'un organisme nuisible largement répandu.

Ironiquement, les évaluations de risque de mauvaises herbes ont la plus grande probabilité d'être fausses quand elles sont plus efficaces en prévenant les coûts et impacts cumulatifs de contrôle, et potentiellement profitable à plus large groupe d'intérêt. Qu'un peu de risque soit acceptable, est cependant, reconnu par la troisième étape du processus d'évaluation de risque d'organisme nuisible qui concerne la gestion du risque.

LIMITES DE L'EVALUATION DU RISQUE DE MAUVAISES HERBES

Les systèmes d'évaluation du risque préoccupés par les organismes nuisibles de quarantaine et les organismes nuisibles établies visent seulement à prédire les effets nuisibles potentiels d'une espèce. La comparaison de ces aspects avec des effets bénéfiques potentielles, par exemple production d'une nouvelle culture, ou de la nourriture dans un chargement de grains contaminés, est un exercice entièrement à part impliquant des jugements de valeur. Ce n'est pas une composante de l'évaluation de risque de mauvaises herbes en tant que tel.

Deux problèmes importants sont rencontrés lors de la sélection d'un système d'évaluation de risque de mauvaises herbes. Ceux-ci sont particulièrement épineux en considérant des espèces nouvelles dans une région donnée par opposition à celles qui s'y propagent. Premièrement, il est difficile de prédire un organisme nuisible à partir des seules caractéristiques de l'organisme nuisible potentiel. Deuxièmement, il se fait que dans un groupe quelconque d'organismes, ceux atteignant le statut d'organismes nuisibles le font ainsi à un rythme très bas.

Beaucoup d'études ont tenté d'identifier les caractéristiques des organismes nuisibles, qui les distinguent de celles de d'espèces bénignes. Les premières études ont tenté d'identifier une 'mauvaise herbe idéale'. Des 'études plus récentes sont concentrées sur des groupes de plantes similaires dans un pays, sur un continent, ou à travers le monde. Quelques variables sont associées à la nuisance et qui sont largement applicables à tous les groupes de plantes, par exemples les mauvaises herbes herbacées en agriculture, ou des familles de plantes, par exemple les pins. Celles-ci ont rarement une valeur prédictive quand elles sont étendues à des groupes plus larges, des systèmes agricoles à l'environnement naturel, des pins aux autres groupes parmi les conifères. Le consensus apparaît être, qu'il n'existe pas de traits universellement importants pour toutes les espèces dans tous les habitats. Les caractéristiques de l'environnement qui reçoit sont tout aussi importantes.

L'importance d'un trait particulier d'une plante quelconque, pour la détermination du succès ou de l'échec de l'invasion, devient perceptible seulement après que l'espèce se soit établie ou n'a pu le faire dans un nouvel habitat. Puisque le sort de l'espèce devient apparent au cours du

temps, la fiabilité de la prédiction augmentera aussi. Même dans ce cas, il ne peut y avoir de combinaison de caractères endogènes de la plante facile à obtenir de la littérature qui prédise de manière fiable la nuisance potentielle d'une mauvaise herbe. Cependant, la probabilité qu'une espèce de plante s'établisse dans une nouvelle est liée à la pression de ses propagules sur cette région. Ceci peut être défini comme le pourcentage de plantes entières individuelles, ou les parties de reproduction végétative ou sexuée, qui sont dispersées dans une région au cours d'une période de temps donnée. La pression de propagule peut s'opérer à n'importe quelle échelle spéciale. Des exemples de faible pression de propagules sont l'arrivée rare, d'année en année, d'une semence occasionnelle transportée d'une source lointaine par le vent, la semence occasionnelle d'une espèce indésirable dans un lot de semences, ou la plantation rare d'une essence de bois d'œuvre qui produit peu de semences. Des exemples de pression élevée de propagules sont l'arrivée fréquente sur une base régulière de semences transportées par le vent d'une source lointaine, des semences abondantes d'une espèce indésirable dans un lot de semences largement plantées, ou semences abondantes viables et qui se dispersent facilement provenant de larges plantations d'arbres de bois d'œuvre.

La proportion des espèces importées qui deviennent des organismes nuisibles a été calculée approximativement et varie de 0,01:100 pour les angiospermes britanniques, 1,3: 100 pour les poacées en Australie tropicale, et 12,0: 100 pour les pins en Nouvelle Zélande. Cependant, cette large diversité de proportions, et les effets du temps de latence qui s'écoule entre l'établissement de l'espèce et l'acquisition du statut d'organisme nuisible changeant les proportions, signifie que la recherche de toute proportion constante est futile. Comme une conséquence de la faible proportion d'organismes nuisibles dans échantillonnage aléatoire d'organismes apparentés, tout système conçu pour détecter des organismes nuisibles est susceptible d'être aussi souvent faux qu'il est vrai. Les résultats d'une évaluation positive fausse (excluant une espèce qui au fait ne deviendrait pas un organisme nuisible) pourrait avoir des conséquences économiques à long terme pour un pays, par exemple dans le cas d'une nouvelle culture potentielle. Par contre, une évaluation négative fausse (acceptant une espèce qui devient un organisme nuisible) pouvait entraîner de sérieux dommages économiques.

Il est également important de se rendre compte que les introductions à des fins bénéfiques supposées ont aussi un faible taux de succès. Par exemple, des centaines de poacées et d'herbes étaient introduites en Australie et en Nouvelle Zélande, pourtant l'agriculture de ces pays est basée seulement sur une poignée d'espèces. De même, des plantations de forêts exotiques de Nouvelle Zélande et du sud de l'Amérique Latine sont dominées par une seule espèce, *Pinus radiata*. De plus, une estimation du bénéfice économique peut être prédite pour des systèmes agricoles/forestiers en supposant un certain niveau d'intégration dans les systèmes, ou des effets nuisibles en supposant un certain niveau de diffusion en tant qu'organisme nuisible. Par contre, il n'y a pas de théorie écologique adéquate pour étayer les prédictions d'un impact futur de mauvaises herbes potentielles environnementales. Il y a alors une grande difficulté pour prédire les effets négatifs et positifs de nouvelles introductions.

En dépit de l'impasse théorique apparente dans la prédiction des statuts d'organisme nuisible, la tâche doit être entreprise à cause des conséquences de la non détection des nouveaux organismes nuisibles potentielles à la frontière, des espèces bénignes devenant des organismes nuisibles, ou de la diffusion d' organismes nuisibles existants. Les systèmes de sélection de mauvaises herbes ont été conçus pour les plantes ligneuses en général (Reichard et Hamilton, 1997), les groupes de plantes ligneuses (Tucker et Richardson, 1995), et les plantes aquatiques (Champion et Clayton, 2001). Quelques systèmes sont utilisées par les autorités

locales d'évaluation de risque pour utilisation comme outils de quarantaine, c.-à-d. le Département d'Agriculture des États-Unis (Lehtonen, 2001) et le Service Australien d'Inspection de Quarantaine (AQIS/SAIQ) (Pheloung *et al.* 1999). Un échec commun à ces systèmes, est qu'ils ne calculent pas la probabilité de la réalisation d'un impact prédit. De telles prédictions peuvent être réalisées seulement avec des échantillons de grandes tailles de tous les cas individuels dans une classe. Elles exigeraient de grandes bases de données sur l'historique des plantes. En Nouvelle Zélande par exemple, où le nombre total des espèces exotiques est connu, la probabilité qu'une espèce s'acclimate- la première étape pour avoir un impact - a été calculée pour toutes les familles et tous les genres. Ces données peuvent être incorporées dans les évaluations de risque de mauvaises herbes.

Les systèmes d'évaluation de risque de mauvaise herbe ont des limites, mais leur utilisation à grande échelle encouragera la reconnaissance internationale d'évaluation de risque de mauvaises herbes comme une discipline.

Des systèmes d'évaluation de risque opérant à la frontière d'une région pour détecter les organismes nuisibles de quarantaine qui n'y sont pas encore établis, et ceux évaluant des organismes nuisibles établies, ont des différences fondamentales potentielles liées à la gestion du risque. Gérer des organismes nuisibles de quarantaine récemment détectés peut simplement revenir à interdire l'entrée des espèces. Il peut y avoir des coûts inhérents à cela liés par exemple, à la perte des profits de la vente d'une cargaison de semences contenant l'organisme nuisible, ou une nouvelle plante agricole potentielle à laquelle on renonce à cause du statut d'organisme nuisible potentiel de l'espèce. Cependant, pour toute espèce supplémentaire subissant l'évaluation de risque de mauvaises herbes, il y aura un coût d'opportunité relativement faible pour les autorités administratives à moins que cela implique la surveillance d'une nouvelle voie. Par opposition, le résultat d'une évaluation de risque identifiant un organisme nuisible entièrement nouveau dans une région peut exiger une dépense substantielle de gestion pour extirper l'infestation. A moins que des fonds supplémentaires soient disponibles pour le faire, il faudra une re-allocation à partir d'une autre source, habituellement à partir d'autres fonds de contrôle d'organismes nuisibles. Ainsi, il y a un besoin de déterminer les impacts potentiels relatifs à ceux des organismes nuisibles existants. Les systèmes internes d'évaluation de risque de mauvaise herbe ont donc la priorité de gestion et de dépense comme une composante importante de leur processus.

PROCEDURES POUR L'EVALUATION DE RISQUE DE MAUVAISES HERBES DE QUARANTAINE

Le système australien d'évaluation de risque de mauvaise herbe

Le système d'évaluation de risque de mauvaises herbes (WRA) (Pheloung *et al.* 1999)[2] a été développé en Australie et est le système d'évaluation de risque de mauvaises herbes de frontière le plus largement connue et appliquée incluant tous les groupes de plantes. 'L'argument' principal est que si une espèce a eu l'opportunité de devenir une mauvaise herbe dans un autre pays, et l'est devenue, alors elle devrait être classée comme une mauvaise herbe, pourvu que le climat et l'environnement soient compatibles à l'espèce dans le nouveau pays (ils sont supposés être ainsi s'il n'y a pas d'information). Alors que cet argument est essentiellement circulaire – c'est une mauvaise herbe ailleurs, donc elle le deviendra ici - une histoire de nuisance ailleurs a efficacement permis de prédire la nuisance (de mauvaise herbe)

[2] L'acronyme WRA s'applique exclusivement au système décrit par Pheloung et al. (1999).

dans plusieurs études (Scott et Panetta, 1993; Reichard et Hamilton 1997; Williamson, 1998; Maillet et Lopez-Gacia, 2000). Le système d'évaluation du risque de mauvaise herbe (WRA) était testé à Hawaii où il a eu le plus de succès parmi tous les cas qui ont été comparés (Daehler et Carino, 2000). Jusqu'au moment où la théorie de risque de mauvaise herbe à une meilleure précision de la pratique d'évaluation de risque de mauvaises herbes, le système WRA est un outil convenable de quarantaine dans les pays en développement. Cet argument est davantage renforcé par le fait qu'il est impératif pour ces pays de protéger des terres productives d'un genre ou d'un autre des mauvaises herbes susceptibles de provenir des pays développés (ou via leurs voisins) dans les articles de commerce, par exemple des semences de graminées, ou comme une conséquence des projets d'aide, par exemple les projets de reforestation encourageant la plantation de légumineuses arbustives. Parce que la nuisance actuelle ou potentielle de telles espèces est ordinairement reconnue dans les pays développés d'où ces articles ou projets proviennent, l'argument principal d'histoire de mauvaise herbe sera l'un des plus puissants dans l'identification des organismes nuisibles de quarantaine dans les pays en développement. Ironiquement, l'inverse n'est pas forcément le cas. Par exemple, ces 20 dernières années, 70 espèces de plantes se sont adaptées en Nouvelle Zélande qui ne sont connues dans la végétation sauvage dans aucun autre pays hors de leur région d'origine. Celles-ci étaient introduites principalement pour l'horticulture urbaine et elles proviennent surtout des pays en développement où leur nuisance potentielle n'a pas été reconnue, par exemple, *Cotoneaster* spp. de la Chine.

Le WRA donne une note pour la nuisance de mauvaises herbes et convertit ceci dans une recommandation d'entrée pour un taxon spécifié. Il satisfait aussi plusieurs autres exigences d'un système d'évaluation de biosécurité acceptable (Hazard, 1988; Panetta, 1993). Il peut être calibré et peut être validé contre un grand nombre de taxons déjà présents dans le pays qui les reçoit. Ceux-ci devraient représenter le spectre complet des taxons qui peuvent être probablement importés dans ce pays. Il a quelque succès en distinguant les mauvaises herbes de celles qui ne le sont pas, si bien que la majorité des mauvaises herbes ne sont pas acceptées et celles qui ne sont pas des mauvaises herbes ne sont pas rejetées, et la proportion des taxons exigeant une évaluation plus poussée est réduite au minimum. Le système identifie aussi le type de système de mise en valeur de la terre le taxon va en toute probabilité envahir. Ceci aide à une évaluation économique de ses impacts potentiels. A cet égard il apparaît qu'il a plus de succès dans l'identification des mauvaises herbes agricoles que des mauvaises herbes du point de vue environnemental. Le WRA tente de séparer les plantes d'intérêt économique de celles qui, invraisemblablement, n'ont aucun bénéfice économique dans un nouveau pays. Cependant, là où un taxon peut avoir des avantages économiques significatifs, la valeur économique devrait être notée dans une démarche transparente séparée et doit être mise en comparaison avec la nuisance en tant que mauvaise herbe dans des évaluations appropriées de risque de mauvaise herbe (Walton et Parnell, 1996).

Le WRA n'est pas forcément informatisé, mais lorsqu'il est informatisé il devient interactif. Ceci permet aux utilisateurs de mesurer l'influence des différentes valeurs d'attribut sur les notes engendrées. Finalement, le système s'est avéré rentable aux importateurs futurs et aux autorités de contrôle de frontière en Australie et en Nouvelle Zélande.

Approche de liste permise

Le processus dans lequel le WRA opère tel qu'il est décrit ici est basé sur le concept d'une Liste Permise d'espèces de plantes (ou taxons définis). Ce système est utilisé par les autorités de quarantaine en Australie (Walton 2001) et en Nouvelle Zélande. Le concept sous-jacent est

que si une espèce, ou tout taxon sub-spécifique, avec le potentiel d'être un organisme nuisible dans une région n'est pas sur une liste de taxons autorisés dans cette région, alors elle y sera interdite jusqu'à ce qu'elle ait subi la catégorisation en tant qu'organisme nuisible (Figure 5). Plusieurs pays, par exemple les États-Unis d'Amérique, ont des listes d'espèces de quarantaine, mais n'ont pas de listes permises. Ils ne déterminent pas si chaque espèce nouvelle à un pays devrait être sur l'une ou l'autre liste. Un avantage d'une liste permise est qu'elle déclenche automatiquement une analyse de risque d'organisme nuisible dans les circonstances où il n'y aurait pas eu d'analyse. Il y a trois étapes dans l'approche de liste interdite (Walton, 2001).

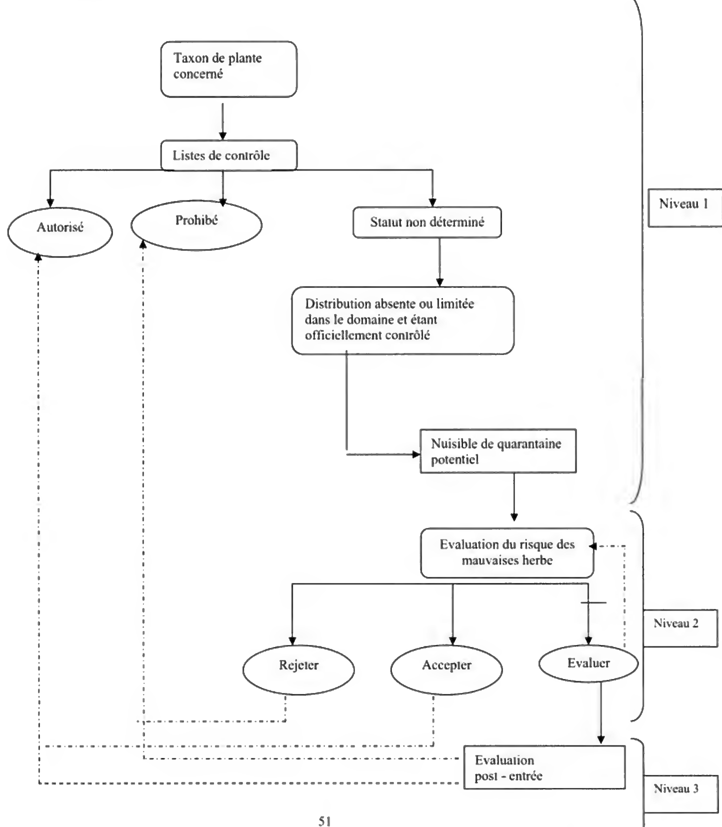


Figure 5. Diagramme de flux pour le criblage des introductions de plantes incluant l'approche de liste permise (Source : Panetta et *al.* 1994).

Il y a trois étapes pour l'approche de liste interdite (Walton, 2001).

Niveau 1. La première tâche est d'identifier correctement un taxon et déterminer s'il est énuméré comme interdit ou permis. Ceci exige la vérification de son espèce, genre et noms de famille, et s'il y a des synonymes. L'étape suivante est de vérifier sa présence dans le pays, soit seulement en culture ou dans le milieu sauvage. Si une espèce n'est ni permise ni interdite, sa diffusion dans la région et s'il est ou non sous contrôle officiel restent à déterminer. Les types d'information nécessaire pour déterminer ceci sont donnés dans l'Appendice 1.

Dans certains cas, la collecte d'information sur son statut dans la région peut révéler aussi bien sa présence, qu'une évidence suffisante pour justifier une analyse interne de risque d'un organisme nuisible. Le résultat peut conduire à mettre le taxon sous contrôle officiel. Ceux avec une diffusion limitée seraient automatiquement enregistrés sur la liste interdite. Les données devraient être enregistrées dans des bases de données appropriées à toutes les étapes, par exemple, l'Appendice 1.

Niveau 2. Une fois qu'un taxon a été classé comme un organisme nuisible de quarantaine potentielle, il subit une évaluation de risque de mauvaise herbe. Ceci implique l'utilisation système WRA qui recommande qu'une espèce soit rejetée, acceptée, ou subisse une évaluation plus poussée. Les espèces rejetées ou acceptées sont ajoutées t aux listes interdites et permises, respectivement. Autrement, une évaluation plus poussée peut être exigée si l'importateur souhaite continuer.

Niveau 3. Une classification de 'accepté' ou 'rejeté' ne peut pas toujours être obtenue du deuxième niveau après la collecte de renseignements supplémentaires. Il peut s'avérer nécessaire de conduire des essais au champ ou en serre pour évaluer davantage une espèce. Ceux-ci devraient être conduits dans un environnement protégé d'où l'espèce ne pourrait s'échapper des semences emportées par le vent, par exemple, ou 'se cacher ' dans des banques de semence persistantes. Que le futur importateur considère que cet effort supplémentaire se justifie peut dépendre des gains potentiels de l'espèce de plante.

Opération WRA

Le WRA est basée sur des réponses à quarante-neuf questions. Celles-ci couvrent un grand nombre d'attributs de nuisance afin de trier les taxons qui vont en toute probabilité devenir des mauvaises herbes dans la nature et/ou en agriculture. Les questions sont divisées en trois sections produisant des notes identifiables qui contribuent à la note totale (l'Appendice 3).

Biogéographie (Section A): englobe la distribution dont fait état la littérature, les préférences climatiques, l'histoire de culture, et la nuisance d'un taxon de plante ailleurs dans le monde, c.-à-d. en dehors du pays bénéficiaire proposé. La nuisance en tant que mauvaise herbe ailleurs dans le monde est un bon indicateur du fait qu'un taxon devienne une mauvaise herbe dans de nouvelles régions avec des conditions écologiques similaires. La question concernant l'histoire de la culture reconnaît l'importante de la composante humaine dans la pression de propagules. De telles données ne sont évidemment jamais disponibles pour le nouveau pays

proposé. La distribution mondiale et les préférences climatiques, là où celles-ci sont disponibles, sont utilisées pour prédire une distribution potentielle dans le pays bénéficiaire.

Les attributs indésirables (Section B): sont des caractéristiques tels que les fruits toxiques et l'appétence pour le bétail, ou le comportement invasion, tel que l'habitude de croissance grimpante ou étouffante, ou la capacité de survivre dans l'ombre épaisse.

La Biologie/écologie, (Section C): sont ces attributs qui permettent à un taxon de se reproduire, se disperser, et persister, par exemple si la plante est dispersée par le vent ou par les 'animaux, et si les semences survivraient après passage dans l'intestin d'un animal.

La disponibilité de l'information est souvent limitée pour les nouvelles espèces, et le système de notation reconnaît qu'un minimum d'information est nécessaire pour donner une note et une recommandation. Le système WRA exige les réponses à deux questions dans la Section A, deux dans la Section B, et six dans la Section C avant qu'il ne donne une évaluation et une recommandation. La recommandation peut être comparée au nombre de questions répondues comme une indication de sa fiabilité. Celle ci s'améliore lorsque des réponses sont apportées à davantage des questions.

Les réponses aux questions fournissent une note totale potentiel qui s'étend de -14 (taxons bénins) à 29 (nuisance maximale) pour chaque taxon. Le score total est réparti entre les réponses aux questions relatives principalement à l'agriculture, à l'environnement, ou communes aux deux (Appendice 3). Les scores totaux sont convertis en une des trois recommandations possibles par deux arrangements critiques de score. Le score critique le plus bas, 0, sépare les taxons acceptables de ceux requérant une évaluation, et le score critique le plus élevé, six, sépare les taxons requérant une évaluation de ceux qui seraient rejetés. L'évaluation pourrait signifier soit obtenir plus de données et reprendre le déroulement du modèle, soit entreprendre davantage d'investigations tels que les essais en champ.

Les questions à l'intérieur de la WRA devraient être légèrement changées pour chaque région significativement différente. Elles doivent tenir compte des différences régionales concernant les sols et le climat. Ceci était fait en adoptant le modèle pour la Nouvelle Zélande. Les arrangements critiques pour modifier la probabilité pour une espèce d'être acceptée ou rejetée peuvent être ajustée selon un niveau différent de risque acceptable. Ceci exigerait l'essai des nouveaux arrangements vis-à-vis d'un grand nombre d'espèces dans la région.

Tous les détails sur l'utilisation de WRA sont disponibles au site connecté du Service Australien d'Inspection de Quarantaine (http: //www.affa.gov.au), ou de l'auteur.

PROCEDURES POUR L'EVALUATION INTERNE DE RISQUE DE MAUVAISE HERBE

Choix d'un système

Les objectifs dans la caractérisation des organismes nuisibles de quarantaine potentielles sont relativement simples parce que les espèces sont uniformément à leur phase de migration (Figure 3). En revanche, les objectifs et l'information que requiert un système interne d'évaluation de risque de mauvaise herbe changent quand l'espèce se propage. Les décisions sont prises de plus en plus à un niveau local. La politique et l'économie peuvent de plus en plus entrer dans l'analyse au fur et à mesure que les bénéficiaires du contrôle deviennent

identifiables et la compétition pour les ressources entre les secteurs augmente (Panetta *et al.* 2001). Ces dernières questions ne sont pas exhaustivement traitées ici, mais consulter Wainger et King (2001). La sélection de systèmes d'évaluation interne de risque de mauvaise herbe doit donc considérer l'étape (s) de dispersion de tous les organismes nuisibles mis en comparaison, les impacts sur les systèmes qu'ils affectent, les bénéfices probables (et les bénéficiaires) des efforts de contrôle, et la qualité de l'information disponible. Ces facteurs varient largement à l'intérieur des pays et entre les pays. Il y a de nombreux systèmes internes de risque de mauvaise herbe en usage. Souvent plusieurs sont simultanément utilisés dans un pays, même au niveau national.

Le tableau 1. Les systèmes principaux prioritairement utilisés pour l'évaluation interne de risque de mauvaise herbe et la prioritisation.

Auteur (s)	Approche
Champion & Clayton, 2001	Scores pour l'écologie des plantes, la et la nuisance des mauvaises herbes aquatiques
Esler *Et al.* 1993	Sommes des scores pour la capacité de réussir avec un score pour la nuisance de mauvaise herbe
Hierbert, 1997	Pèse l'impact relatif contre la facilité de contrôle et le coût d'une action tardive
Randall 2000	Scores pour envahissement / impacts / distribution potentielle / étape d'envahissement
Tucker & Richardson, 1995	Modélise les attributs des espèces et les ajuste avec l'environnement
Timmins & Owen, 2001	Approche explicitement basée sur les mauvaises herbes Cf. site, considère la valeur de la région potentiellement affectée
Virtue *Et al.* 2001	Multiplie les points pour l'envahissement, les impacts, et la distribution (courante et potentielle)
Wainger & King, 2001	Relie la probabilité des dommages / fonctions définies du paysage / et l'échelle de menace à une réponse appropriée

Un système sûr et praticable pour une application à un niveau local est celui de Randall, (2000).Des systèmes plus précis et écologiquement défendables se focalisent sur des biomes spécifiques, telles que les buissons d'arbustes d'Afrique du sud (Tucker et Richardson, 1995) ou les mauvaises herbes aquatiques (Champion et Clayton, 2001). Les systèmes aquatiques sont presque une classe à eux tout seul et les autorités devraient être circonspects vis à vis de toute nouvelle espèce aquatique. Somme toute, des systèmes généralisés sont vraisemblablement nécessaires en premier lieu dans la plupart des pays en développement. En plus, la compréhension détaillée de la relation entre les attributs d'espèce et l'environnement qui rend des systèmes spécifiques de biome- efficaces est mal compris pour la plupart des biomes.

Un seul système largement applicable ne peut être recommandé jusqu'à ce que les objectifs du système d'évaluation interne de risque de mauvaise herbe soient déterminés. Des pays établissant des systèmes d'évaluation de risque de mauvaise herbe au niveau national devraient s'assurer que les données recueillies sont applicables à une gamme d'étapes de diffusion et aux échelles spatiales de contrôle de mauvaises herbes. Des ressources nationales pour l'évaluation rendues disponibles par le gouvernement central devraient être allouées là où les profits à long terme seront beaucoup plus grands. Ceci signifie premièrement un système de trie à la frontière, deuxièmement un système de mise en priorité des espèces dans les

phases de premier établissement ou d'expansion, et seulement après aux espèces qui ont consolidé leur dispersion (Figure 3). Pour ce dernier groupe, le système détaillé de Virtue *et al.* (2001) au niveau national pourrait être amélioré seulement avec un effort considérable, mais auront besoin d'être adapté à la région considérée.

Facteurs à considérer

Cette section décrit les facteurs à considérer, le type d'information dont on a besoin et qui probablement serait disponible à différentes étapes de dispersion, et le processus par lequel on détermine quel type de système d'évaluation de risque de mauvaise herbe est requis dans des séries spécifiques de circonstances. Plusieurs de ces considérations sont pertinentes à une variété d'échelles, d'une seule propriété à tout un pays, et elles sont toujours limitées par la quantité totale de ressources pour le contrôle des organismes nuisibles dans la région concernée.

Histoire de mauvaise herbe de plantes congénères

Des systèmes d'évaluation de risque de mauvaises herbes développés pour la frontière, par exemple le WRA, considère habituellement les nuisances des plantes apparentées à une espèce évaluée comme des indicateurs de statut d'organisme nuisible potentiel. Ce facteur a été rarement considéré comme une composante de risque des systèmes conçus pour l'espèce aux toutes premières étapes de dispersion. Des exceptions sont là où cette association est entraînée par le groupe d'espèce classée, par exemple les pins (Tucker et Richardson, 1995). Le comportement des plantes apparentées à une l'espèce (par exemple famille, genre) à plusieurs niveaux de regroupement taxonomique peut être utilement incorporé aux évaluations internes de risque de mauvaise herbe. Ceci s'applique particulièrement aux espèces à leurs toutes premières étapes d'invasion, là où en l'absence de d'autres informations, il peut contribuer à affirmer la probabilité d'une invasion réussie. La nuisance en tant que mauvaise herbe est concentrée dans certains genres dans certaines familles et largement disséminée au sein de plusieurs genres dans d'autres. Que ces estimations de probabilités puissent se faire au niveau de la famille ou au niveau de la sous-famille, dépend de la taille de la famille de plante et des genres. Plusieurs genres sont trop petits pour donner des ratios statistiquement fiables.

Contrôle par rapport à une mauvaise herbe et par rapport à un site

Il y a une tendance à contrôler seulement ces espèces familières qui, traditionnellement sont contrôlées. Cette inertie demande un système de mise en priorité qui détourne les ressources des espèces qui sont incontrôlables à une échelle donnée et à les allouer à d'autres qui sont contrôlables à la même échelle. Une fois que des tentatives pour extirper une espèce ou la réduire en dessous d'une densité de population définie sur la totalité d'une région donnée (contrôle par rapport à l'espèce) ont échoué, alors elle devrait être seulement contrôlée dans des endroits spécifiques de haute valeur dans la région (contrôle par rapport au site). Le concept a été développé pour les mauvaises herbes des zones protéges en Nouvelle Zélande (Williams 1997) et l'application de ce principe aux terres domaniales est expliquée par Timmins et Owen (2001). Ceci est pertinent pour une gamme de systèmes, y compris les systèmes agricoles, et peut être utilisé pour prioriser des organismes nuisibles susceptibles d'être contrôlé au niveau national.

Etape d'invasion

Quelque estimation de l'étape d'infestation d'une espèce, ou un substitut, est nécessaire pour déterminer la faisabilité du contrôle. Un indice au taux de dispersion peut être indiqué par le temps de résidence de l'espèce dans la région, si ceci est connu, comparé à la distribution actuelle. Cependant, à moins qu'une espèce de plante soit déjà énumérée comme un organisme indésirable dans une région donnée, souvent le niveau de l'expansion (Figure 3) permet de se rendre compte de la présence d'un nouvel organisme nuisible potentiel. A cette étape, la plupart des organismes nuisibles récemment reconnus sont bien établies et se propagent. Là où les distributions historiques sont inconnues, l'approche la plus simple à l'étape d'infestation qui évite la difficile question d'interprétation du taux de dispersion est de savoir à quel point l'espèce s'est établie c.-à-d. le nombre actuel, la taille, et la distribution des infestations. Ceci est aussi étroitement lié au contrôle potentiel des espèces – celles qui se propagent rapidement vont souvent bien s'établir avec plusieurs foyers d'infestation, et seront plus coûteuses à contrôler si elles se dispersent à grande échelle. Ces facteurs de niveau et taux d'expansion doivent être considérés dans le contexte du temps de régénération de l'espèce. Une espèce ne se propage pas nécessairement en première position aux habitats les plus favorables ou potentiellement nuisibles. On doit tenir compte des habitats plus favorables et/ou des modes de faire-valoir de la terre les plus vulnérables qu'elle pourrait rencontrer quand elle se propage.

Préalables pour l'extirpation d'un organisme nuisible

Les systèmes pour déterminer si l'espèce est candidate pour un contrôle par rapport à une mauvaise herbe-pilote ou par rapport à un site doivent aboutir à une réponse du type 'oui' ou 'non'. Les prédictions des résultats de gestion peuvent être plus fiables que celles concernant un écosystème plus complexe et des interactions économiques. La question, "est-ce qu'elle peut être tuée?", est plus facile à répondre que "affectera-elle la biodiversité?", ou, "Quel impact économique aura-t-elle?" Même pour les véritables mauvaises herbes bien établies, particulièrement dans les systèmes naturels, le stimulant le plus significatif pour leur gestion peut être aussi déterminé principalement par le coût et l'efficacité des mesures de contrôle (Panetta et James, 1999).

Partout dans le monde L'extermination des espèces a été rarement réalisée sur des aires qui vont au delà de quelques hectares. Sans tenir compte de la zone couverte ou des impacts perçus qu'un organisme nuisible peut avoir, il y a des questions critiques pour prévenir, choisir et déterminer le niveau de gestion:

- Est-ce que tous les individus de l'espèce peuvent être localisés; et est-ce que les mesures de contrôle praticables sont disponibles?
- Est-ce que tous les individus peuvent être ciblés dans une période de temps définie dictée par le cycle de vie de la plante?
- Est-ce que les réponses de la plante aux mesures de contrôle sont connues?
- Est-ce que les ressources pour traiter de nouvelles plantes, au moins aussi vite qu'elles apparaissent, sont disponibles pour entreprendre le travail de suivi?

Celles correspondant aux réponses 'oui' à ces questions ont une plus grande priorité pour le contrôle par rapport à une mauvaise herbe- que celles avec dont la réponse est 'non'. L'information sur plusieurs aspects d'une espèce est nécessaire avant de pouvoir réponde à ces questions, et à d'autres questions.

Attributs biologiques

Une note d'avertissement peut être faite ici. Une large gamme d'attributs biologiques a été utilisée dans les tentatives pour caractériser la nuisance des mauvaises herbes et établir une priorité pour le contrôle. Le WRA considère aussi ces facteurs (Appendice 3). Les attributs biologiques les plus détaillés sont seulement supposés correspondre à l'envahissement, même si ceci signifie dispersion, contrairement à impact. Pendant que quelques règles très générales reliant des attributs de l'espèce à l'envahissement émergent, celles-ci s'appliquent à quelques groupes de plantes seulement dans des habitats spécifiques. Ceux-ci ont souvent des régimes de perturbation particuliers, y compris ceux déterminés par les activités humaines. Dans beaucoup de systèmes naturels ou semi naturels l'importance relative de divers modes de dispersion n'est pas connue. Par exemple, jusqu'à ce que le nombre relatif des plantes ligneuses potentielles dispersées par le vent et à fruits charnus potentiellement disponibles pour coloniser la végétation arborée de bas-fond en Nouvelle Zélande soit connu, il est incertain que le syndrome de fruit charnu en soi a conduit à l'abondance relative du dernier groupe. Ainsi, des attributs tel que le mode de dispersion peuvent être utilisés avec plus d'intégrité s'ils sont indirectement utilisé pour déterminer des options de gestion, tel que la fréquence de recherche, plutôt qu'en tentant de prédire les taux d'invasion pour ainsi dire.

Facilité d'éradication

L'intensité de contrôle d'une mauvaise herbe peut être considérée comme étant le produit de la difficulté à tuer un individu à sa première apparition, y compris des facteurs tels que des effets sur des organismes non cibles, multiplié par la fréquence de visites pour répéter le traitement de l'infestation. Si une espèce de plante a une histoire de nuisance alors elle va en toute probabilité avoir certains attributs identifiables qui la caractérisent, par exemple banque de semences persistante, et avoir été sujette à des tentatives de contrôle ailleurs. Ceux-ci peuvent aider à évaluer la difficulté de contrôle dans la nouvelle région. Là où il n'y a pas eu d'histoire même de culture, ou de nuisance dans sa région d'origine, la facilité d'éradication doit être déduite des attributs de l'espèce ou de ses congénères. Ces attributs pourraient être classés de différentes façons, mais quatre semblent être d'une importance capitale.

Temps de détection

La détection de nouvelles infestations dans une ou deux générations est importante si l'espèce doit être éradiquée ou restreinte dans un petit domaine. Ceci signifie que l'espèce doit être reconnaissable comme une mauvaise herbe dès le début. Des espèces qui ne peuvent être facilement remarquées en milieu sauvage, telle qu'une graminée courte ou une liane avec un feuillage discret, sont susceptibles d'être confondues avec des espèces nobles par un observateur non averti. Elles vont en toute probabilité se disperser avant qu'elles ne soient reconnues comme mauvaises herbes. Elles seront plus difficiles à contrôler que des espèces dont la présence peut être facilement remarquée.

Capacité reproductive

La quantité de semences viables et la reproduction végétative peuvent être des composantes critiques du succès de l'invasion. Cependant, il y a moins de certitude concernant l'importance relative de ces facteurs à l'invasion, ou à la facilité d'éradication. Des espèces qui ont des banques de semences persistantes peuvent être tout aussi difficiles à éradiquer que celles n'ayant pas de banques de semences mais qui se reproduisent par voie végétative. Il est

évident que des espèces avec plus d'un système de reproduction sont en moyenne plus envahissantes, que celles ayant un seul système. Ceci est en partiel dû au fait qu'une espèce qui a plusieurs stratégies de reproduction peut traverser une grande variété de barrières à l'invasion. Au fur et à mesure que la population augmente les barrières changent. Les espèces peuvent alors être classées selon le nombre de stratégies reproductives qu'elles ont, sans faire des suppositions sur l'importance relative de ces stratégies.

Dispersibilité

Le potentiel pour la dispersion est évidemment essentiel mais l'importance relative de différents mécanismes de dispersion ne devrait pas être exagérée dans l'évaluation de risque de mauvaise herbe – la plupart des plantes ont un système de dispersion. Des semences aérophiles sont ordinairement transportées sur de longues distances, et les petites semences mieux que les semences de grande taille, peuvent être consommées et dispersées par les animaux transhumants. Mais, la taille d'une semence doit être toujours considérée dans le contexte de la catégorie des agents de dispersion disponibles et les mécanismes potentiels de dispersion dans la région. La dispersion passive par l'eau, la machinerie, etc., et par des contaminants de produit peut être plus importante que les caractéristiques biologiques. Aussi, elles peuvent interagir, par exemple il plus probable que les petites semences soient transportées par la machinerie que les grosses semences. En évaluant le risque d'invasion, les routes de dispersion probables (voie fluviale, pistes de ferme, etc.) doivent être prises en compte, en même temps que la convenance du paysage environnant pour l'espèce. Aux premières étapes de l'invasion, une contribution importante de la dispersibilité à la nuisance est la facilité de passer inaperçu, tel que discuté ci-dessus.

Population

Les attitudes des populations vis à vis des 'espèces de plante varient énormément. Pendant que certaines espèces sont considérées comme nuisibles par tout le monde, d'autres sont utiles à divers secteurs de la communauté. Les résultats des activités humaines impliquant ces espèces utiles, y compris les organismes nuisibles reconnus, peuvent avoir une influence primordiale sur leur diffusion. Les attitudes vis-à-vis d'une espèce doivent être prises en compte, et en règle générale, ces espèces favorisées pendant une saison ou une autre seront les plus difficiles à extirper. Pour qu'une espèce soit éligible à un programme visant à l'extirper d'une région donnée, la probabilité de re-infestation à partir des sources extérieures devrait être nulle ou très faible. Ceci n'est souvent pas possible pour ces espèces commercialement produites et qui sont aussi des organismes nuisibles. Ici il peut être possible de minimiser le risque que l'espèce aille au delà des plantations en empêchant la régénération de l'espèce dans la région concernée. Cette option peut s'appliquer quand une décision est prise que le profit qui résulte d'une nouvelle espèce compense le risque, et que les procédures de gestion de risque d'organisme nuisible sont mises en place pendant que l'espèce est commercialement produite.

Climat équivalent

L'utilité d'un climat équivalent à l'évaluation de risque de mauvaises herbes change quand un organisme nuisible se propage. Aux toutes premières étapes seulement la plus large équivalence entre la région d'origine (région natale et ou adventive) et la région potentielle est exigée pour considérer l'espèce comme un organisme nuisible potentielle, parce que le climat peut ou peut ne pas être la barrière majeure limitant sa propagation. Plusieurs graminées originaires d'Afrique tropicale, par exemple, sont maintenant largement répandues dans les

régions tempérées. Aux dernières étapes et à une échelle locale, l'équivalence de climat est moins importante parce que l'espèce a montré son potentiel de propagation, et les systèmes de classification sont seulement nécessaires pour établir l'ordre de priorité entre les organismes nuisibles connus. Ainsi, l'équivalence de climat entre la région actuelle et la région prédite est plus utile comme un outil de mise en priorité aux étapes intermédiaires de diffusion, particulièrement quand c'est considéré à l'échelle du pays. L'équivalence de climat exige des données complètes de distributions dans les régions considérées. Sur une base de pays par pays, ceci exige des bases de données nationales complètes. Si les données étaient recueillies sur une base régionale, par exemple Amérique Latine méridionale, peut-être sous le couvert d'organisations tel que COSAVE [Le Comité de Protection de des Conifère du Sud (Comité de Sanidad Vegetal del Cono Sur - COSAVE)] cela aurait une plus grande utilité que simplement sur une base nationale. L'équivalence de climat est une activité de spécialiste au delà de l'étendue de ce rapport, mais le lecteur peut se référer à Kriticos et Randall (2001) pour un résumé de l'applicabilité de plusieurs gammes de logiciel à ce sujet en Australie.

Impact

Les organismes nuisibles ont des impacts économiques, écologiques, et/ou sociaux, et la méthode d'évaluation doit définir lequel de ceux-ci elle tente d'évaluer. Les estimations fiables d'impact sont possibles seulement après que l'organisme nuisible ait commencé à se propager. Les estimations d'impact impliquent souvent un calcul de temps d'impact unitaire une mesure de la superficie couverte. Plusieurs types d'impact peuvent être déterminés ou estimés, pour une ou plusieurs espèces, et incorporés dans un système de notation (Virtue *et al.* 2001). Des impacts peuvent être déterminés sur une échelle très grossière et mis simplement en équation avec la présence, par exemple, une espèce est présente dans 'x' systèmes de mise en valeur de la terre et dans 'y' régions d'un pays. Des échelles plus fines peuvent être utilisées, et extrapolées à toute la gamme des espèces, par exemple, une mauvaise herbe est pulvérisée à un coût de 'w' dollars sur un 'x' hectares ce qui reviendrait à 'z' dollars sur toute sa région potentielle.

Les impacts des espèces ailleurs peuvent être applicables dans la nouvelle région. En l'absence de l'histoire, l'impact doit être estimé à partir des attributs de l'espèce. Ceux-ci vont varier par rapport aux systèmes de mise en valeur de la terre susceptibles d'être affectés. Dans les systèmes agricoles, l'impact des organismes nuisibles apparentés peut être pris en compte. Dans les zones protégées cependant, il n'y a aucune mesure d'impact universellement applicable. Parker *et al.* (1999) ont proposé des paramètres qui pourraient éventuellement être quantifiés comme suit: I (Impact total) = R (étendue) x A (Abondance) x E (impact per capita).

Les espèces varient énormément dans la biomasse à maturité qui peut être produite d'une seule propagule (semence) ou bouture (morceau de tige ou racine). Une estimation de la biomasse et de l'étendue d'une espèce peut contribuer à une estimation rudimentaire d'impact. Il peut avoir l'évidence de son taux de croissance en terme de hauteur et surface couverte. Ils vont en toute probabilité s'étendre au-delà de dizaines d'ordre de grandeur, par exemple d'un seul plant de graminée de 10 cm de haut et 25 cm^2 (0,002 m3), à une herbe pérenne typique, 1 m^2 et 1 m de haut (1 m3), aux arbres de 10 m de haut avec des couronnes de 10 m de diamètre (1 000 m3). 'E' est probablement lié au *log* du volume d'une seule plante individuelle: 1, 10, 100, 1 000, 10 000. Ces données peuvent être réduites à des scores allant de 1à 5. La biomasse comme une mesure de substitution d'impact est probablement modifiée par l'interaction physique de l'espèce avec la végétation désirable. L'information est généralement disponible sur le fait que l'espèce cohabite avec ou remplace la végétation désirée. Les effets à long

terme des mauvaises herbes soit dans la voûte foliaire soit dans la couche régénératrice inférieure sont surtout inconnus. L'intuition suggère que le remplacement de la couverture végétale, à court terme, supprimera plusieurs espèces, y compris des invertébrés, que l'occupation simple d'une position sous-la voûte foliaire. Cette généralisation ne peut s'appliquer à toutes les espèces, par exemple pour les plantes herbacées qui augmentent les effets d'incendie dans les systèmes naturels. De même, l'impact est probablement lié à la persistance sur site, que ceci soit le fait d'une seule génération, ou de générations successives.

Conception d'un format de score

Un système de score ou de classification pour des évaluations internes de risque de mauvaises herbes devraient incorporer tous les principes d'un système d'évaluation de quarantaine, autre que la condition requise pour assumer des obligations internationales (à moins qu'ils soient en mesure d'influencer le commerce international). Il devrait être conçu pour produire des hiérarchies, ou autres formes de classification. Ceux-ci devraient être basés sur l'hypothèse que les options de gestion de mauvaise herbe sont une fonction de l'importance du risque, que le plus grand profit est réalisé en contrôlant des populations aux toutes premières étapes d'invasion, et que le score sera modifié par la position du gestionnaire pour réduire le risque. Il devrait identifier l'étape(s) d'invasion ciblée et les écosystèmes potentiellement affectés. Il ne devrait pas être plus détaillé que nécessaire pour utiliser l'information disponible. Parce que la technologie de contrôle de mauvaise herbe et les ressources disponibles pour gérer le risque peuvent changer, celles-ci devraient être considérés comme des modules séparés et incorporées dans le processus de décision.

Des systèmes de classification en usage diffèrent dans l'information requise pour les opérer, et aussi dans la structure de leurs règles internes. Les systèmes les plus simples donnent des scores numériques à une série de critères qui peuvent ou peuvent ne pas être divisés en des sections, et sont alors additionnés. Les questions peuvent avoir des valeurs égales ou inégales. Les scores individuels peuvent, ou peuvent ne pas, être modifiés par les réponses aux autres (Pheloung *et al.* 1999). Les sous-totaux d'une section peuvent être modifiés par d'autres sous-totaux (Owen, 1998; Randall, 2000). Les aspects de l'espèce apparaissent parfois deux fois, comme par exemple dans sa capacité innée à être un organisme nuisible et la facilité avec laquelle elle peut être contrôlée (Hierbert, 1997). Il peut avoir ou ne pas avoir des scores par défaut là où les questions ne sont pas été répondues, et des points peuvent être déduits si des réponses à certaines questions sont négatives (Pheloung *et al.* 1999). D'autres opèrent par des arbres de décision hiérarchique (Reichard et Hamilton, 1997). Dans une approche complètement différente, Tucker et Richardson (1995) ont utilisé un système expert où une série de questions élimine les espèces à risque élevé ou faible avant d'aller à la question suivante.

Un système d'évaluation interne de risque de mauvaise herbe devrait confirmer, plus ou moins, la classification existante des mauvaises herbes dans une région pour l'étape de diffusion prédéfinie, si ceci a été entrepris par des experts (Hiebert, 1997; Pheloung *et al.* 1999), plutôt que de produire un reclassement d'espèces par priorité. En d'autres termes, les résultats de tout nouveau système doivent être intuitivement justes pour que le système soit accepté et appliqué. Cette approche enregistre alors toute connaissance des mauvaises herbes d'une région et la formalise dans un système qui est transparent, reproductible, et applicable à des espèces nouvellement reconnues.

Le développement de ces systèmes sur des tableurs permet aux composantes de scores d'être ajustées et d'examiner les effets sur les classifications d'espèces.

RESSOURCES REQUISES POUR L'EVALUATION DE RISQUE DE MAUVAISES HERBES

Une évaluation de risque de mauvaise herbe est principalement un 'exercice livresque' comprenant la collecte de toute information disponible à propos d'un organisme nuisible potentiel, son interprétation, et une prise de décision. Il y a fondamentalement trois types d'information nécessaire, de même que l'accès à l'Internet pour les réunir :

- La ressource primaire exigée pour se conformer aux normes de l'IPPC est une liste d'espèces de plantes exotique dans le pays, et si elles sont ou non sous contrôle officiel. Recueillir une telle information pour les espèces cultivées et sauvages est une tâche énorme qui a été accomplie dans très peu de pays. La première priorité pour la plupart des pays qui ne disposent pas de cette information est de limiter la liste seulement aux plantes exotiques sous contrôle officiel. Leurs noms doivent être valides, et idéalement, il devrait avoir un spécimen de comparaison. Une fois que ceci est terminé, la tâche peut être élargie pour inclure des plantes sauvages exotiques qui ne sont pas sous contrôle. Ces tâches exigent une proche collaboration d'une gamme d'organisations nationales et régionales y compris les herbiers, les universités, les bibliothèques, et les départements d'agriculture.

- Les Livres sont une source importante d'information sur les plantes. Ceux entreprenant des évaluations de risque de mauvaise herbe devraient accéder à toutes les flores régionales appropriées et à aux nombreux livres sur les mauvaises herbes du monde ou aux listes régionales de mauvaises herbes. Une collection de base de tels livres est donnée dans l'Appendice 4. Les deux les plus important sont Holm *et al.* (1979) décrivant les pires des mauvaises herbes du monde, et Huxley (1999) (voir Appendice 4), qui énumère toutes les familles, la plupart des genres, et plusieurs des espèces au monde.

- Les sources d'information en ligne sont maintenant critiques pour l'évaluation de risque de mauvaises herbes. Celles-ci sont esquissées dans l'Appendice 4. Elles peuvent être utilisées pour vérifier l'identification et les noms de plantes, déterminer l'histoire de mauvaise herbe et le statut de nuisance ailleurs, et investiguer sur les méthodes de contrôle. Le courrier électronique est aussi un outil important pour communiquer avec de nombreux experts, de par le monde, qui connaissent ces ressources. Dans de nombreux cas ils peuvent fournir aussi l'information sur des espèces non enregistrées sous.

- Un logiciel d'ordinateur n'est pas critique pour l'évaluation de risque de mauvaise herbe au cas par cas, mais il est potentiellement un outil très important. Cependant, il est nécessaire si les outils d'équivalence de climat doivent être utilisés. En dehors de ce but, les exigences en logiciel portent sur les logiciels de bases de données et, s'il était décidé d'utiliser le système WRA australien, une version récente de EXCEL.

REMERCIEMENTS

Remerciements à John Hedley et Bruce Trangmar pour leurs commentaires utiles; à Anne Austin pour l'édition; et à Jemma Callaghan pour la saisie.

BIBLIOGRAPHIE

CBD. 1993. *Convention on Biological Diversity, Montreal.* Secretariat of the United Nations Conference on Environment and Development.

Champion, P.D. & Clayton, J.S. 2001: A weed-risk assessment model for aquatic plante weeds in New Zealand. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D., Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* CSIRO Publishing, Canberra. pp. 194–202.

Daehler, C.C. & Carrino, D.A. 2000: Predicting invasive plantes: prospects for a general screening system based on current regional models. *Biological Invasions* 2: 93–102.

Esler, A.E., Liefting, L.W. & Champion, P.D. 1993. *Biological success and weediness of the noxious plantes of New Zealand.* MAF Quality Management, Lynfield, Auckland, New Zealand.

FAO. 1996. *Int. Standards for Phytosanitory Measures, Import Regulations: Guidelines for Pest Risk Analysis. Publication No. 2.* Rome, Secretariat of the Int. Plante Convention of the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations.

FAO. 2001a. *Int. Standards for Phytosanitory Measures, Glossary of phytosanitary terms. Publication No. 5.* Rome, Secretariat of the Int. Plante Convention of the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations.

FAO. 2001b. *Int.Standards for Phytosanitory Measures, Pest risk analysis for quarantine pests. Publication No. 11.* Rome, Secretariat of the Int. Plante Convention of Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations.

Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G. 2001. *Weed risk assessment.* Melbourne, CSIRO Publishing.

Hazard, W.H.L. 1988: Introducing crop, pasture and ornamental species into Australia – the risk of introducing new weeds. *Australian Plante Introduction Review* 19: 19–36.

Hiebert, R. 1997. Prioritising invasive plantes and planning for management. *In* Luken, J.O. & Thieret, J.W., eds. *Assessment and management of plante invasions.* New York, Springer-Verlag. pp. 11–19.

IPPC. 1997. *New revised text of the Int. Plante Protection Convention,*1997. Rome, Secretariat of the Int. Plante Convention of Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations.

Kriticos, D.J., Randall, R.P. 2001: A comparison of systems to analyze potential weed distributions. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* Canberra, CSIRO Publishing. pp. 61–82.

Lehtonen, P.P. 2001. Weed initiated pest risk assessment in the United States: guidelines for qualitative assessments. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* Canberra, Australia. CSIRO Publishing. pp. 117–123.

Maillet, J. & Lopez-Gacia, C. 2000: What criteria are relevant for predicting the invasive capacity of new agricultural weeds? The case of invasive American species in France. *Weed Res.* 40: 11–26.

Owen, S.J. 1998: *Department of Conservation Strategic Plan for Managing Invasive Weeds.* Department of Conservation, Wellington, New Zealand.

Panetta, F.D. 1993. A system of assessing proposed plante introductions for weed potential. *Plante Protection Quarterly* 8: 10–14.

Panetta, F.D. & James, R.F. 1999: Weed control tRHesholds: a useful concept in natural ecosystems. *Plante Protection Quarterly* 14: 68–76.

Panetta, F.D., Mackey, A.P., Virtue, J. & Groves, R.H. 2001: Weed risk assessment: core issues and future directions. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* Canberra, Australia. CSIRO Publishing. pp. 231–240.

Panetta, F.D., Pheloung, P.C., Lonsdale, M., Jacobs, S., Mulvaney, M. & Wright, W. 1994. *Screening Plantes for Weediness*: a *Procedure for assessing Species proposed for Importation into Australia.* A report commissioned by the Australian Weeds Committee, Canberra, Australia (unpublished).

Parker, I.M., Simberloff, D., Lonsdale, W.M., Goodell, K., Wonham, M., Kareiva, P.M., Williamson, M.H., Von Holle, B., Moyle, P.B., Byers, J.E. & Goldwasser, L. 1999. Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. *Biological Invasions* I: 3–19.

Pheloung, P. C., Williams, P. A. & Halloy, S. R. 1999: A weed-risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plante introductions. *J. of Environmental Management* 57: 239–251.

Randall, R.P. 2000: Which are my worst weeds? A simple ranking system for prioritising weeds. *Plante Protection Quarterly* 15: 109–115.

Reichard, S. E. & Hamilton, C.W. 1997: Predicting invasions of woody plantes introduced into North America. *Conservation Biology* 11: 193–203.

Scott, J.K. & Panetta, F.D. 1993: Predicting the Australian weed status of southern African plantes. *J. of Biogeography* 20: 87–93.

Timmins, S.M. & Owen, S.J. 2001: Scary species, superlative sites: assessing weed risk in New Zealand's protected natural areas. *In* Groves, R.H.; Panetta, F.D.; Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment*. Canberra, Australia. CSIRO Publishing. pp. 217–227.

Tucker, K.C., Richardson, D.M. 1995: An expert system for screening potentially invasive alien plantes in South African fynbos. *J. of Environmental Management* 44: 309–338.

Virtue, J., Groves, R.H. & Panetta, F.D. 2001: Towards a system to determine the national significance of weeds in Australia. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* Canberra, Australia. CSIRO Publishing. pp. 124–150.

Wainger, L.A. & King, D.M. 2001: Priorities for weed risk assessment: using a landscape contex to assess indicators of function, services and values. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* Canberra, Australia. CSIRO Publishing. pp. 34–51.

Walton, C. 2001. Implementation of a permitted list approach to plante introductions to Australia. *In* Groves, R.H., Panetta, F.D. & Virtue, J.G., eds. *Weed risk assessment.* Canberra, Australia. CSIRO Publishing. pp. 93–99.

Walton, C. & Parnell, T. 1996. Weeds as quarantine pests. *Proc. 11th Australian Weeds Conference.* Shepard, R.C.H., ed. Weed Science Society of Victoria Inc., Frankston, Australia. pp. 462–463.

Williams, P.A. 1997. Ecology and management of invasive weeds. *Conservation Sciences Publication* No. 7. Wellington, Department of Conservation. 67 pp.

Williamson, M. 1998. Measuring the impact of plante invaders in Britain. *In* Starfinger, U., Edwards, K., Kowarik, I. & Williamson, M., eds. *Plante invasions: ecological mechanisms and human responses.* Leiden, The Netherlands. Backhuys Publishers.

WTO. 1994: *Agreement on the application of sanitary and phytosanitary measures.* (also available at *http://www.wto.org*). World Trade Organization, Uruguay Round of Multinational Trade Negotiations. New York, World Trade Organization.

Chapitre 2

Mauvaises herbes à problèmes et leur gestion dans les cultures et en l'absence de cultures

Le tulipier africain dans les Îles Fiji

Bruce A. Auld et Mereseini Nagatalevu-Seniloli

INTRODUCTION

Les espèces ornementales sont majoritairement les plantes récemment naturalisées dans le monde développé dans des pays aussi différents que le Japon et l'Australie. Actuellement dans les pays en développement, les espèces ornementales deviennent de plus en plus une menace pour l'agriculture et les écosystèmes naturels. Ceci s'applique particulièrement aux plantes aquatiques, aux plantes grimpantes, aux lianes, aux arbustes et aux arbres. De plus, les espèces introduites pour un but spécifique tel que la foresterie, peuvent envahir d'autres habitats puis devenir de mauvaises herbes. Mieux que tout autre type de plantes, les arbres exotiques ont le potentiel de changer l'aspect des paysages de par le monde. Ceci en est un exemple.

LA PLANTE

Le tulipier africain, *Spathodea campanulata* Beauv est originaire de l'Afrique équatoriale et appartient à la famille des Bignoniaceae qui renferme un certain nombre d'autres plantes ligneuses ornementales tels que Jacaranda et Tecomaria. Il est également connu sous le nom d'arbre de fontaine, le cèdre indien ou Santo Domingo Mahogany. C'est un grand arbre pouvant atteindre 30 m de haut dans certains habitats. Il a des feuilles composées, attrayantes, de couleur vert foncé et avec une bordure spectaculaire en forme de trompette et des fleurs rouge-orange en grappes terminales. Il a été largement introduit dans les régions tropicales et sub-tropicales du monde comme plante ornementale et arbre de bordure des rues. Dans les zones subtropicales l'arbre est souvent décidu et sans grande importance, mais dans certaines zones tropicales comme les îles pacifiques, il s'est bien développé et s'est propagé.

LE PROBLEME

Le tulipier africain s'est échappé des zones de culture et envahi les terres agricoles, les plantations forestières et les écosystèmes naturels dans les Iles 'Cook', Fiji, Guyane, Hawaii, Samoa et Vanuatu. Aux îles Fiji, il est particulièrement encombrant. Introduit à l'origine dans les années 1930 comme arbre de bordure de rue et plante ornementale dans les maisons, il est reconnu depuis plus de douze ans comme étant un problème. Ces cinq dernières années le problème s'est intensifié.

Les Fiji regroupent quelques 300 îles situées entre l'équateur et le Tropique du Capricorne. Sa superficie de terre ferme est de18 300 km² bien que ses limites territoriales couvrent 1,3 million km². Plus de 90 % des 800 000 habitants vivent dans les deux plus grandes îles Viti Levu et Vanua Levu. L'agriculture est le secteur dominant de l'économie. Les cultures comprennent la canne à sucre, le cocotier, le gingembre, le riz, la vanille et une gamme de fruits et de légumes. L'élevage de bœufs conduit à la production de lait et de viande. Cependant, seulement 16% environ de la superficie de Fiji est propice à l'agriculture et ceci exerce une pression sur ces terres ce qui peut entraîner la mise en culture de terres marginales. L'agriculture itinérante traditionnelle est encore pratiquée dans le sud-est de Viti Levu, ce qui particulièrement sensible à l'invasion par les mauvaises herbes, surtout par le tulipier africain.

Les forêts secondaires de régénération détruites pour l'agriculture représentent 20% de la couverture forestière au Fiji. Actuellement le tulipier africain est l'arbre prédominant dans ces forêts. De plus l'espèce est aussi une mauvaise herbe en culture intensive. Il est difficile de l'éliminer du sol à cause des repoussent à partir des fragments de racines restés dans le sol et de la réinfestation par les plantules. Lors d'une prospection récente dans trois provinces, le tulipier africain a été rencontré dans 98% des fermes visitées et dans plusieurs de ces fermes l'arbre occupe plus de 25% de la superficie.

Comme l'est son impact sur l'agriculture et la foresterie, le tulipier africain constitue également une menace pour la biodiversité dans les îles Fiji. L'arbre s'est acclimaté à la fois à l'ouest (plus sec) et à l'est (plus humide) des principales îles. Les forêts humides des bas fonds et des plateaux, de même que les forêts sèches sont toutes susceptibles à l'invasion par cet arbre. Sa capacité élevée de reproduction sexuée et ses graines aérophiles lui procurent les moyens de coloniser les terres perturbées aux dépends des espèces autochtones. Ces terres perturbées peuvent être créées, sans l'intervention de l'homme, par les tornades et les cyclones tropicaux. Une fois installé dans un endroit, l'arbre est capable d'avoir une croissance végétative vigoureuse pour atteindre et dépasser la taille de la flore autochtone et l'ombrager. L'espèce dominante d'arbres des forêts humides de plateau aux Fiji, *Palaquium hornei* pousse jusqu'à 20–25 m et dans les forêts de bas-fond, les arbres les plus hauts, *Palaquium stehlinii*, *Myristica castaniifolia*, *Calophyllum vitiense* et *Garcinia myrtifolia* atteignent environ 25 m. Le remplacement des espèces autochtones d'arbres par le tulipier africain aura un grand effet sur la biodiversité des forêts du fait que plusieurs espèces autochtones portent une importante flore dépendante d'épiphytes et de plantes grimpantes.

COMMENT LE TULIPIER AFRICAIN EST IL DEVENU UN PROBLEME?

Aux Fiji, tulipier africain produit des fleurs et des graines pendant plusieurs mois. Chaque arbre produit des centaines de capsules (gousses) fruits (environ 22 cm x 5 cm) contenant chacune plusieurs centaines de graines. Les graines sont elliptiques largement ailées (environ 2.5 cm x 1.5 cm), très légères et facilement transportées par le vent. Libérées à une hauteur élevée, ces propagules sont capables de se disperser sur une grande distance, surtout en temps de vent. Les gousses peuvent également flotter facilitant l'invasion des zones riveraines.

L'arbre drageonne facilement à partir des racines et se régénère à partir des fragments de racines. Le bois de l'arbre est fragile et les branches se cassent souvent en période d'orage. Dans l'environnement tropical humide de Fiji, il peut se drageonner à partir des fragments de branches traînant à la surface du sol. Il tolère l'ombrage à tel point qu'une fois installé à un endroit, il est difficile de le contrôler.

L'arbre a été largement planté dans les villes et dans des villages reculés pendant plusieurs années. De plus les tiges lignifiées du tulipier africain ont été utilisées comme pieux vivant pour les clôtures des fermes. Celles sont devenues de nouveaux des arbres et ont produit des graines.

Ainsi, il y a une source énorme et largement répandue de graines et de propagules végétatives dans les îles et qui continuent d'envahir les terres agricoles, les plantations forestières et les écosystèmes naturels. Du reste, il n'y a aucun ennemi naturel de l'arbre dans le Pacifique.

GERER LE PROBLEME

Les paysans qui pratiquent l'agriculture itinérante et d'autres qui utilisent les méthodes de production plus intensive ont tous des difficultés à gérer le tulipier africain. Des recherches récentes faites par le ministère de l'agriculture de la pêche et des forêts (MAFF) du gouvernement fidjien a abouti des recommandations de gestion chimique utilisant le mélange 2,4-D + dicamba pour l'application dans des décortications annulaires ou sur des souches et pour la pulvérisation sur les jeunes plantes. Cependant, le contrôle chimique ne suffit pas à lui seul et n'est pas approprié pour un problème si largement répandu et aussi complexe. Une approche multifaciale est nécessaire.
Au prime abord, un programme de sensibilisation communautaire impliquant à la fois les paysans et la communauté plus élargie est nécessaire, , pour mettre les gens en garde contre les menaces que comporte cette plante et leur conseiller d'arrêter de le planter comme plante ornementale et comme pieux vivants de clôture. Ceci devrait inclure des conseils l'élimination des jeunes plants avant floraison, avec des supports visuels décrivant les jeunes pousses afin de permettre de les reconnaître tôt et de les éliminer.

Contrairement à la plante adulte, les jeunes plantules n'ont pas des feuilles composées. Les cotylédons ont la forme caractéristique d'un haricot et les feuilles qui suivent sont simples, disposées en paires opposées, les paires alternes disposées à angle droit. Après les six premières paires de feuilles, les feuilles composées commencent à se former.

Des travaux plus avancés sur la gestion intégrée de cette espèce demanderaient davantage de connaissance sur son écologie, y compris ce qui suit :

- Période pendant laquelle les graines germent;
- Degré de tolérance à l'ombrage des plantules;
- Age auquel les plantes entrent en floraison pour la première fois;
- Période pendant laquelle se forment les drageons;
- Ages et taille minimale des fragments des racines et de tiges requis pour obtenir de nouvelles plantules ;
- Age des drageons quand ils entrent en floraison pour la première fois ;
- Période que couvre la floraison des plantes ; et la longévité de la banque de semences.

Avec ces informations, des programmes de gestion spécifiques à des systèmes de cultures et de foresteries, pourront être mis au point et mis en application.

Les grands arbres dans des endroits inaccessibles continueront de servir de source de ré-infestation sauf s'ils sont contrôlés. Le contrôle biologique classique est une option possible. Les organismes s'attaquant aux graines ou aux fleurs pourront réduire l'impact de ces arbres. Des prospections préliminaires en Afrique avaient permis de découvrir un acarien ériophyide qui attaque les feuilles de l'espèce, causant des galles et éventuellement la mort de la tige.

Ceci met en exergue des occasions de conflit d'intérêts au sein de la communauté. Plusieurs tulipiers africains matures font partie de la flore dans les parcs et jardins de la capitale, Suva et dans d'autres villes. Il se pourrait que de nombreux citadins n'acceptent que pas que les fleurs et les feuilles spectaculaires de ces arbres soient défigurées. En clair, un consensus au sein de la communauté devrait être obtenu avant que toutes étapes irréversibles de lutte contre les tulipiers africains ne soient entreprises.

Progrès sur la gestion de *Rottboellia cochinchinensis*

Bernal E. Valverde

INTRODUCTION

L'herbe queue de rat (*Rottboellia cochinchinensis* [Lour.] Clayton) est graminée annuelle de type C^4 érigée, fortement touffue, connue comme étant un compétiteur vigoureux et pouvant atteindre une hauteur de plus de 4 mètres (Holm *et al.* 1977, Figure 1). Son nom commun en anglais "Itchgrass" [1] est lié aux poils siliceux, fragiles et irritants couvrant la gaine foliaire et qui se cassent au contact de la peau. Elle est originaire de l'ancien monde (Afro-Asiatique) et était probablement introduite dans le nouveau monde au début du vingtième siècle. Ici, dans son aire de distribution exotique, les infestations sont considérées comme étant les plus sévères, peut être à cause de plusieurs facteurs qui y contribuent, notamment une compatibilité climatique améliorée, l'intervention humaine dans la dissémination de la graminée, des pratiques agronomiques favorables et l'absence d'ennemis naturels qui ont co-évolué avec la plante (Ellison et Evans, 1992). En plus des endroits né-tropicaux où elle est une importante mauvaise herbe dans plusieurs cultures y compris le maïs, la canne à sucre, le riz pluvial de plateau, les haricots, le sorgho et quelques plantes pérennes telles que les citrus et les palmiers à huile au début des stades de croissance, elle a été rapportée comme mauvaise herbe de plusieurs cultures dans de nombreux pays (Holm *et al.* 1977). L'herbe queue de rat est plus signalée comme mauvaise herbe de la latitude 23°N à la latitude 23°S, dans isotherme 20°C (Reeder, 2000, communication personnelle), mais elle possède la capacité de croître, fleurir et fructifier sous des régimes tempérés rencontrés aux Etats Unis où elle peut atteindre 75 à 100% de sa croissance potentielle (Patterson *et al.* 1979). Seulement en Amérique centrale et dans les Caraïbes, on estime que l'herbe queue de rat affecte plus de 3,5 millions d'hectares (FAO, 1992). Elle est également considérée comme étant une importante mauvaise herbe en Afrique de l'Ouest (Chikoye *et al.* 2000). Le présent chapitre porte sur des concepts importants et des tactiques de gestion intégrée de l'herbe queue de rat en mettant l'accent sur les cultures annuelles dans les néo-tropiques.

IMPORTANCE ECONOMIQUE

Une revue précédente (Labrada, 1994) a montré l'importance économique de l'herbe queue de rat. Les infestations par l'herbe queue de rat peuvent entraîner jusqu'à 80% de perte de cultures ou même l'abandon de terres agricoles (Holm *et al.* 1977; Tableau 1). Les paysans pauvres des régions tropicales consacrent beaucoup de temps et des ressources substantielles pour lutter contre l'herbe queue de rat dans des cultures de subsistance. Les paysans des zones à saisons sèches de la région pacifique de Costa Rica, par exemple, utilisent environ 34% de l'ensemble des intrants pour la lutte contre l'herbe queue de rat seulement, qui se fait par une combinaison de méthodes manuelles (fauchage) et chimiques, particulièrement l'utilisation du paraquat (Calvo *et al.* 1996). Les coûts des méthodes de lutte dans le cas du maïs peuvent atteindre 26% du revenu de la vente du grain (Valverde *et al.* 1999b). Là où elle est présente, les paysans considèrent habituellement l'herbe queue de rat comme étant une mauvaise herbe très ennuyeuse. Les paysans de Costa Rica reconnaissent que sa croissance rapide et son effet dépressif sur le rendement sont les caractéristiques préjudiciables de l'herbe queue de rat, puis reconnaissent la grande quantité de graines qu'elle produit (Calvo *et al.* 1996; Valverde *et al.* 1999b).

Dans le système de l'agriculture sur brûlis en Amérique du Sud, l'herbe queue de rat envahit les champs issus de l'abattage des forêts et plus particulièrement ceux issus de la jachère. Dans ces conditions les paysans la considèrent comme étant l'une des plus mauvaises herbes

les plus indésirables (Fujisaka *et al.* 2000). Dans le cas des cultures plus intensives telle que la canne à sucre, l' herbe queue de rat est une mauvaise herbe majeure et a été largement signalée dans plusieurs pays tels que Brésil (Arevalo et Bertoncini, 1994), Costa Rica (Vargas-Acosta, 1993), Cuba (Maldonado, 2000), Guatemala (Jiménez *et al.* 1990), Malaisie (Anwar 2001), Mexique (Valverde *et al.* 2001), Trinidad (Bridgemohan et Brathwaite, 1989) et Venezuela (Valle *et al.* 2000).

Tableau 1. Effet de populations de ***R. cochinchinensis*** non contrôlées sur les rendements du maïs et de la canne à sucre.

Rendement en conditions d'absence de mauvaises herbes	Rendement avec une longue saison d'interférence de l'herbe queue de rat	Densité de l'herbe queue de rat	Pourcentage de réduction	Pays	Référence
Kg ha^{-1}	Kg ha^{-1}	plantes m^{-2}			
Maïs					
3200	700	260	79	Honduras	Sharma et Zelaya 1986
		13, 50, 145	33, 47, 71	Rhodesie	Thomas et Allison 1975
9360	4780	55	47	Trinidad	Bridgemohan *et al.* 1992
4591	2841	440	38	USA (Louisiana)	Strahan *et al.* 2000a
4.98, 7.14	2.70, 3.27	80	46, 54	Costa Rica	Rojas *et al.* 1993b
Canne à sucre					
7120	4090	12-34 par m linéaire à 2 semaines après émergence	43 (sucre)	USA (Louisiana)	Lencse et Griffin 1991

CHARACTERISATION BIOECOLOGIQUE

L'herbe queue de rat se reproduit exclusivement, par les graines qui sont disséminées par l'eau, les machineries agricoles et les oiseaux. Sur de longues distances, la principale forme de dissémination demeure la contamination des semences des cultures. Les graines de l'herbe queue de rat ont été retrouvées dans des lots de semences de riz réceptionnés à l'Institut International de Recherche sur le Riz aux Philippines (Huelma *et al.* 1996). On spécule que l'herbe queue de rat a été introduite aux Etats Unis au début des années 1990, où le mouvement récent dans de nouvelles régions a été enregistré tout au long des voies de chemin de fer (Hall et Patterson 1992). De la même façon, il y a des indications d'un tel type de dissémination dans les mouvements de semences de riz entre la Colombie et le Brésil en 1961 (Millhollon et Burner, 1993). Dans le Campeche et d'autres régions au Mexique, les paysans ont identifié les semences contaminées de riz comme étant à la base de l'introduction de l'herbe queue de rat dans leurs champs (Valverde *et al.* 1999, 2001). Le mouvement du bétail et de la machinerie agricole sont incriminés pour l'introduction de l'herbe queue de rat de la Thailand en Malaisie (Anwar, 2001).

Les données rapportées sur le nombre de graines produites par plante varient suivant les localités. Au Costa Rica, nous avons estimé la production de graines à environ 10 000 graines m^{-2} une seul plante de l'herbe queue de rat poussant isolément produisant entre 570 et 730 graines (Smith *et al.* 2001). De la même façon, Tucuch, (1991), a estimé la production de graines à 6 500 m^{-2} en culture de maïs à Campeche au Mexique. Hall et Patterson (1992) ont rapporté qu'une seule plante de l'herbe queue de rat peut produire entre 2 200 et 16 500

graines. La contribution des graines à la banque de semences du sol est bien plus faible qu'on aurait pu prédire à partir de la quantité produite par plante. Une grande proportion des graines est perdue avant la campagne suivante. Dans un champ fortement infesté au Costa Rica, les graines traînant à la surface du sol ont été comptées en début de la campagne et cela a donné une estimation de 324 graines m^{-2} (Smith *et al.* 2001). Les habitudes de dormance et de germination des graines varient substantiellement à travers le monde (Holm *et al.* 1977). Bridgemohan *et al.* (1991) ont démontré que dans les champs de maïs, 40 à 60% de graines de l'herbe queue de rat ont persisté dans le sol un an après leur enfouissement, la dormance innée et la dormance forcée contribuant respectivement pour 8,5% et 35% au mode de persistance. Au Costa Rica, Rojas *et al.* (1994) ont montré que peu de graines viables persistaient encore après 18 mois dans le sol, soulignant ainsi l'importance de la prévention de la production de graines dans le cadre de la gestion de cette mauvaise herbe. Les graines à la surface et celles enterrées à 5 et 10 cm de profondeur, perdent substantiellement leur persistance. A 20 cm de profondeur, moins de 10% des graines sont restées viables. Bridgemohan *et al.* (1991) ont également montré dans leur cas que le labour accroît le taux de diminution de la réserve de graines de 32% par an.

Les plantules émergent de façon intermittente dans le champ, surtout après une perturbation du sol. Selon nos propres observations, la mortalité densité-dépendante revêt une importance pratique lorsque la densité de l'herbe queue de rat est supérieure ou égale à 40 plantules par m^{-2}. La biomasse aérienne maximum a été estimée à environ 600 g m^{-2}. Dans de telles conditions de saturation la biomasse par plante a atteint environ 15 g. Au Costa Rica, Rojas *et al.* (1993b) ont démontré que la période critique de l'interférence de l'herbe queue de rat sur le maïs se situe entre 45 et 60 jours après le semis à des densités de l'herbe queue de rat comprises entre 66 et 74 plantes m^{-2}. Quand la concurrence entre l'herbe queue de rat et le maïs est sans aucune restriction, elle réduit les rendements du maïs de l'ordre de 46 à 54 %. Aussi, au Trinidad, Bridgemohan *et al.* (1992) ont déterminé que la période critique d'interférence était de 0 à 63 jours après émergence à 55 plantes m^{-2} de l'herbe queue de rat avec une réduction de rendement de l'ordre de 50% dans les parcelles non sarclées. Dans les milieux plus tempérés, l'herbe queue de rat est aussi très compétitive. En Louisiane (Etats-Unis) l' herbe queue de rat a réduit en moyenne le rendement en grain de maïs de 125 kg ha^{-1} par semaine d'interférence avec la culture, jusqu'à atteindre un total de 38% de réduction de rendement lorsqu'elle interfère avec le maïs une saison entière (Strahan *et al.* 2000b). De façon similaire, Rahman et Price, (2001) ont déterminé que même en cas de très faibles densités, l' herbe queue de rat demeure très compétitif avec la canne à sucre et que la perte de rendement de la culture est très liée à la densité de l'herbe queue de rat. Dans les conditions de leur expérimentation au Soudan, les pertes causées par l'herbe queue de rat ont été estimées à 64 et 43% respectivement dans les plantes et dans les repousses de canne à sucre. L'herbe queue de rat est très compétitive pour la lumière (Bridgemohan et McDavid, 1993) et, de plus il a été suggéré qu'elle est allélopathique aux cultures, y compris le maïs (Bridgemohan *et al.* 1992, Bridgemohan et McDavid, 1993) et le riz, (Casini *et al.* 1998).

L'herbe queue de rat a des biotypes et plusieurs ont été décrits dans chaque pays. Au moins cinq biotypes ont été signalés aux Philippines (Pamplona et Mercado 1981) et plusieurs au Brazil (Alves *et al.* 2001). Millhollon et Burner (1993) ont scindé l'ensemble des biotypes de 34 pays en cinq principaux groupes basés de façon principalement sur l'effet de longueur du jour sur la floraison, mais aussi sur la morphologie générale et le mode de croissance. Les biotypes peuvent aussi être différenciés par des analyses d'isozymes, en particulier les estérases (Fisher *et al.* 1987). Au Costa Rica, la différentiation de biotype a été rapportée (Rojas *et al.* 1992, 1993c) en se basant sur la morphologie de la plante (hauteur, tallage, pubescence) et la longueur du cycle végétatif sous des conditions comparables. Une caractérisation récente de 38 biotypes de l'herbe queue de rat en provenance de 20 pays ou territoires par le polymorphisme amplifié de la longueur du fragment (AFLP), a indiqué une base génétique extrêmement étroite présentant plus de 80% de similitude entre tous les

biotypes, résultant probablement de la prédominance des intra croisements naturels de la mauvaise herbe et de expansion géographique relativement récente. Cependant, AFLP a permis d'identifier cinq groupes majeurs de biotypes qui ont été étroitement reliés à leur répartition géographique. Deux de ces groupes majeurs ont été constitués de biotypes collectés essentiellement en Amérique Latine, ce qui suggère que la majorité des biotypes d'Amérique Latine ont pu être produits à partir d'un nombre limité d'introductions, probablement en provenance d'Afrique et d'autres en provenance d'Asie (R.H. Reeder, 2000, communication personnelle).

GESTION DE *R. cochinchinensis*

La réussite de la gestion de l'herbe queue de rat dépend de la diminution de la quantité de ses graines dans le sol et de l'empêchement de la production de graines (Bridgemohan et Brathwaite 1989; Valverde *et al.* 1999b). Aucune stratégie de lutte à elle seule ne peut permettre d'atteindre cet objectif, d'où la nécessité d'une vraie stratégie intégrée pour baisser régulièrement les populations de l'herbe queue de rat. Les techniques disponibles et prometteuses englobent les options mécaniques, culturales, chimiques et biologiques. L'éradication en tant que stratégie ne semble pas être entièrement faisable, même quand une nouvelle infestation et très localisée dans une ferme ou un pays est détectée tôt. Par exemple, des efforts pour l'éradication ont été initiés à Wales Estate qui est l'une des unités majeures de production de canne à sucre en Guyane, aussitôt après que l' herbe queue de rat a été identifiée en 1991. Les endroits affectés ont été désignés comme zones de restriction. Tout mouvement relatif à l'agriculture avait été soumis à une autorisation préalable, y compris celui des travailleurs et des équipements et l'utilisation du matériel venant des sites déjà infestés a été bannie. Plusieurs tactiques ont été mises en œuvre pour éliminer la mauvaise herbe : arrachage, application d'herbicide, culture de légumineuses de couverture ou inondation en période de la jachère (dans leur système de production, les champs inondés demeurent sous l'eau pendant 6 à 12 mois après le labour, mais avant la plantation. Bien que le programme d'éradication n'a pas éliminé la mauvaise herbe après cinq ans, il a réduit la densité des sites infestés et a limité les nouvelles infestations (Bishundial *et al.* 1997).

Méthode mécanique de lutte

Un labour superficiel peut être pratiqué pour susciter la germination de l'herbe queue de rat avant la plantation. Les plantules qui émergent pourront être alors gérées par de méthodes mécaniques additionnelles ou avec des herbicides. L 'échec d'un du contrôle des plantules de l'herbe queue de rat après la préparation du sol, peut cependant conduire à une densité extrêmement forte qui pourra substantiellement baisser les rendements des cultures. Dans les petites fermes le fauchage ou le labour des interlignes sont souvent pratiqués, mais la pratique reste inefficace puisque les plantules qui poussent dans les lignes de culture échappent au contrôle et vont donc augmenter la réserve de semences et réduire les rendements de la culture (Bridgemohan et Brathwaite, 1989). Le labour dans les cultures peut endommager les racines des plantes cultivées et ramener les graines en surface ou leur germination est facile et accroître le risque d'érosion (Maillet, 1991; Bridgemohan et Brathwaite, 1989).

Méthode culturale de lutte

Etant donné que l'herbe queue de rat est facilement disséminé avec les semences de culture, un important moyen pour prévenir son introduction et extension dans d'autres champs est l'utilisation de semences certifiées.

Plusieurs pratiques agronomiques peuvent aussi aider à réduire les densités de l'*herbe* queue de rat et diminuer la réserve de semence, une fois la mauvaise herbe installée. La rotation de

cultures pourra aider à rompre l'étroite association entre l'herbe queue de rat et certaines cultures (tels que le maïs et la canne à sucre) en permettant l'utilisation de tactiques alternatives contrôle tels que d'autres herbicides (graminicides sélectives) et l'inondation. La monoculture de maïs facilite le rapide établissement de l'herbe queue de rat comme mauvaise herbe dominante (Fisher *et al.* 1985).

L'une des meilleures techniques mises au point par la recherche pour étouffer avec succès les plantes de l'herbe queue de rat est l'utilisation des plantes de couverture. Les plantes de couverture ont été développées en Amérique Centrale, en Afrique et en Asie pour améliorer les caractéristiques du sol et pour la lutte contre les mauvaises herbes (Buckles et Triomphe, 1999, Carangal *et al.* 1994, Tarawali et Ogunbile, 1995). Elles peuvent être utilisées soit comme élément dans un système de rotation ou soit comme cultures associées. La préférence a été donnée aux légumineuses fixatrices d'azote telles que *Cajanus cajan*, *Calopogonium mucunoides*, *Canavalia* spp., *Crotalaria* spp., *Dolichos lablab*, *Pueraria phaseoloides*, *Mucuna* spp. (pois mascate), et *Stylosanthes* spp.

La sélection des espèces de plantes de couverture devrait prendre en compte les conditions locales et les systèmes de cultures de même que les besoins des paysans, y compris la prise en compte de l'effet compétitif négatif sur la culture, les problèmes supplémentaires liés au contrôle des ravageurs, le coût de gestion et la valeur ajoutée des cultures de couverture en tant que complément alimentaire et dans la prévention de l'érosion du sol (Kirchhof et Salako, 2000). Les légumineuses de couverture augmentent le carbone organique du sol et les niveaux de phosphore et améliore la capacité d'échange cationique et les teneurs en calcium (Obi, 1999). Certaines de ces plantes de couverture sont également allélopatiques. Les substances allélo- chimiques présentes dans *le* pois mascate sont des inhibiteurs de croissance des mauvaises herbes (Anaya, 1999, Caamal-Maldonado *et al.* 2001, Fujii *et al.* 1991).

Treize espèces de légumineuses ont été au départ criblées pour leur adaptation et leur utilité dans la suppression de l'herbe queue de rat dans la région de Guanacaste au Costa Rica (De la Cruz *et al.* 1994). Les meilleures plantes de couverture furent *Mucuna deeringiana*, *P. phaseoloides*, *Canavalia ensiformis*, *Vigna unguiculata* et *D. lablab*. Parmi celles-ci, *Mucuna* spp. fut la plus suppressive vis à vis de l'herbe queue de rat. Le pois mascate (Figure 2), *C. ensiformis* et *V. unguiculata* ont été davantage évaluées comme plantes de couverture. La densité de l'herbe queue de rat a été réduite d'environ 60% tant en présence de *Mucuna* spp. que de *C. ensiformis* et de l'ordre de 55% avec *V. unguiculata* comparativement a la parcelle témoin non désherbée, 90 jours après le semis (JAS). L'herbe queue de rat a substantiellement réduit les rendements de maïs qui étaient presque dix fois plus élevés en présence des légumineuses suppressives. La suppression de l'herbe queue de rat et la couverture du sol étaient meilleures lorsque les plantes de couverture étaient semées simultanément avec le maïs ou une semaine plus tard, comparativement à deux semaines après le semis du maïs. *Mucuna* spp. paraît être plus approprié pour l'adoption par les paysans puisqu'il s'agit d'une espèce annuelle, facile à gérer et avec une meilleure habitude de croissance (Valverde *et al.* 1999b).

L'association de *Mucuna* spp. avec le maïs aussi bien à 50 000 qu'à 80 000 plantes ha^{-1} a réduit la biomasse de l'herbe queue de rat à la récolte du maïs entre 75 et 95% (Valverde *et al.* 1995). Inversement, la densité de l'herbe queue de rat n'a ni affecté la biomasse de *Mucuna* spp. ni montré de différence entre les deux densités de *Mucuna* spp. Mais, aussi bien *Mucuna* spp. (semé une semaine après le maïs) que le l'herbe queue de rat ont réduit le rendement en grains jusqu'à 40%. Ces résultats ont suscité l'idée de recherches supplémentaires dans le but de mieux définir les dates de semis et les densités des cultures de couverture afin de minimiser les effets négatifs sur le rendement de la culture.

L'interaction entre *Mucuna* spp., le maïs et l' herbe queue de rat a été davantage étudiée pendant deux saisons de culture. Deux variétés de *Mucuna* spp. (graines tachetées et graines grises) ont supprimé de manière similaire l'infestation naturelle de l'herbe queue de rat à 60 JAS ou après. A la fin de la période critique de compétition (45 JAS), *Mucuna* spp. a supprimé la biomasse de l'herbe queue de rat de 60 à 80%. En première année, la variété améliorée de maïs (*Diamantes*) a produit plus que la variété locale (*Criollo*) et *Mucuna* spp. n'a pas baissé le rendement de maïs.

Mais en deuxième année, *Mucuna* spp. a légèrement réduit le rendement de maïs et la variété Criollo était plus compétitive vis a vis de l' herbe queue de rat et a produit environ 70% plus de graines que Diamantes. La variété locale a un cycle plus court et a probablement échappé aux effets négatifs du stress hydrique sévère présent tard dans la deuxième saison de culture (Valverde *et al.* 1999b).

Des expérimentations répétées ont porté sur l'impact de la densité (25 000 ou 50 000 plantes ha^{-1}) de *Mucuna* spp. et le temps de semis (0, 5, 10 ou 15 JAS) sur *R. cochinchinensis* et le maïs (cv Diamantes). A forte densité, *Mucuna* spp. était plus efficace dans la réduction de la densité de l'herbe queue de rat. Une meilleure couverture de sol par *Mucuna* spp. a été observée lorsqu'elle a été semée en même temps que le maïs, par rapport à la couverture du sol lorsqu'elle est semée plus tard après la culture, probablement à cause de la compétition imposée par le maïs à la plante de couverture. A 45 JAS, *Mucuna* spp. (semée à 50 000 plantes ha^{-1} simultanément avec la culture) a réduit la densité de l'herbe queue de rat de 23 et 46% par rapport aux témoins enherbés. De manière concomitante, la biomasse de l'herbe queue de rat a décru de 10 à 15% lorsque la densité de *Mucuna* spp. s'est accrue de 25000 à 50000 plants
ha^{-1}. Des rendements plus faibles de maïs étaient obtenus en culture associée avec *Mucuna* spp. à sa plus forte densité et en particulier lorsque la plante de couverture a été semée en même temps que le maïs. L'herbe queue de rat réduit lui même le rendement en grain de maïs d'environ 46% (Valverde *et al.* 1999b).

La taxonomie de *Mucuna* spp. demeure toujours confuse. Des espèces précédemment identifiées sont actuellement considérées comme étant des variétés de *M. pruriens*, une notion récemment soutenue par la caractérisation génétique utilisant les marqueurs moléculaires (Capo-chichi *et al.* 2001). Un autre type de *Mucuna* spp. (*M. cochinchinensis*, aussi identifié comme *M. pruriens* var. *cochinchinensis*) s'est révélée efficace dans la lutte contre le chiendent (*Imperata cylindrica*) dans les cultures de maïs et de manioc en Afrique de l'Ouest, bien que des préoccupations similaires en ce qui concerne ses effets sur les rendements des cultures aient été soulevées (Chikoye *et al.* 2002). En se basant sur leurs caractéristiques, Akanvou *et al.* (2001) ont indiqué que les légumineuses arbustives à port érigé *Crotalaria juncea* et *C. cajan* et la légumineuse rampante *M. pruriens* sont plus compétitives que *C. mucunoides* (rampante aussi) et les espèces arbustives semi érigées tels que *Stylosanthes hamata* et *Aeschynomene histrix*. *M. pruriens* et *C. mucunoides* ont respectivement accumulé 77 et 63 kg de N ha^{-1}, et ont produit un total similaire de biomasse sèche (3.5–4.0 T ha^{-1}). Pour que l'azote soit disponible pour la croissance des cultures, les plantes de couverture doivent se décomposer en premier.

Les jachères de *Mucuna* spp. ont également été largement adoptées dans plusieurs parties de l'Afrique de l'Ouest, pour la plupart à cause de leur capacité à supprimer l'imperata (Tarawali *et al.* 1999). Dans les conditions de jachère au Nigeria, la teneur en azote des plantes en végétation sur pied (litière non comprise) à 16 semaines après le semis était de 228, 143, et 241 kg ha^{-1} respectivement *M. cochinchinensis*, *Lablab purpureus* et *Crotolaria ochroleuca* (Carsky *et al.* 2001). L'augmentation du rendement résultant d'une amélioration de l'absorption de l'azote peut être observée lorsque le maïs est semé après une légumineuse de couverture (Tian *et al.* 2000). Les rendements du riz sur les parcelles avec un précédent de

jachère de légumineuses ont été de 30% plus élevés que ceux obtenus des parcelles avec une jachère naturelle de mauvaises herbes (Becker et Johnson, 1998).

Un système de culture basé sur le pois mascate comme plante de couverture est bien établi dans certaines régions en Amérique centrale et plus particulièrement au Honduras où les paysans pendant plus de 25 ans largement adopté cette espèce pour améliorer les conditions du sol, la conservation de l'eau, la suppression des mauvaises herbes et les rendements du maïs. Il est intéressant de noter que le cas du Honduras le système de culture à base de *Mucuna* spp. a été menacée par l'introduction de l'herbe queue de rat au milieu et à la fin des années 80, augmentant les coûts de lutte contre les mauvaises herbes et réduisant les rendements de maïs (Buckles et Triomphe, 1999).

Il y a aussi d'autres types d'interactions entre les plantes de couvertures et l'herbe queue de rat. Dans le sud du Nigeria, *Centrosema pubescens* est l'une des légumineuses fourragères les plus populaires. Cependant, ses performances sont diminuées par un dessèchement foliaire causé par *Rhizoctonia solani*. Il a été montré que l'herbe queue de rat qui pousse dans la couverture de *Centrosema* peut servir de réservoir pour l'agent pathogène (Oben *et al.* 1997). La mauvaise herbe est également énumérée comme plante hôte de *R. solani* AG-1, qui cause le dessèchement foliaire à Rhizoctonia chez le soja (Black *et al.*1996).

Lutte biologique

Du fait que l'herbe queue de rat se développe bien dans les zones exotiques, une gestion complémentaire et très prometteuse reste la lutte biologique classique. Parmi les nombreux agents pathogènes de l'herbe queue de rat testés pour servir d'agents de lutte biologique, un charbon des inflorescences *Sporisorium ophiuri* (P. Henn) Vanky (Ustilaginales), a été minutieusement étudié (Ellison, 1987, 1993; Reeder *et al.*1996). Le charbon est un agent pathogène tellurique et systémique, infectant les plantules de l'herbe queue de rat avant leur émergence du sol. *S. ophiuri* a été enregistré comme le charbon de sommité affectant l'herbe queue de rat en Afrique et en Asie, et limité à l'ancien monde (Reeder et Ellison, 1999). Les plantes infectées individuellement en pots ont eu un développement similaire aux plantes saines, mais lorsqu'elles ont été en compétition (8 plantes par pot), celles infectées de charbon ont produit moins de talles que les plantes saines (Reeder *et al.*1996). Expérimentalement, les plantes infectées ont produit moins de graines que les plantes saines. Dans les zones où la mauvaise herbe est endémique, des plantes sont couramment infectées par ce charbon avec un taux élevé par population. Des isolats du charbon ont été identifiés comme étant biotype spécifiques, mais un isolat provenant de Madagascar peut infecter une large gamme de biotypes y compris certains provenant d'Amérique Latine. Pour cela cet isolat a été sélectionné pour un criblage d'une gamme d'hôtes. Le charbon a été reconnu comme possédant une forte spécificité à son l'hôte : aucune des 49 espèces/variétés des plantes tests de graminées autres que l'herbe queue de rat n'a été infectée. Les espèces criblées comprennent les pâturages, les graminées cultivées (riz, canne à sucre, maïs, sorgho) et la teosinte (*Zea (Euchlaena) mexicana*), l'ancêtre du maïs (Reeder et Ellison 1999, Valverde *et al.*1999b).

La rouille foliaire, *Puccinia rottboelliae* P. et H. Sydow (Uredinales), a également été identifiée comme agent pouvant causer des dommages sévères à *R. cochinchinensis* au champ, en particulier aux jeunes plantules. Elle peut compléter l'effet du champignon du charbon, en réduisant la capacité compétitive de la mauvaise herbe dans les systèmes de culture (Reeder *et al.* inédit). Malheureusement, aucune des souches de la rouille qui furent criblées n'a été suffisamment virulente sur aucun des biotypes d'Amérique du Sud sur lesquels elles ont été testées. C'est pourquoi le criblage de la gamme de plantes hôtes a été suspendu.

L'herbe queue de rat est aussi très sensible à *Exserohilum monoceras*, un champignon dont l'utilisation est à l'étude pour la lutte contre *Echinochloa colona* (Zhang et Watson, 1997). Il est potentiellement possible d'utiliser des pathogènes locaux en complément à d'autres méthodes de lutte contre l'herbe queue de rat. (Zúñiga *et al.* 2000). Jiménez *et al.* (1990) a décrit au Guatemala une pourriture de l'épillet de l'herbe queue de rat causée par *Fusarium moniliforme*. Les plantes infectées n'ont pu produire de graines viables et, dans les tests préliminaires le pathogène a montré une certaine spécificité par rapport à l'herbe queue de rat. Au Costa Rica, des souches pathogéniques de *Curvularia* sp., *Drechslera* sp. et de *Fusarium* sp. se sont avérées infectieuses pour *R. cochinchinensis*, leur sévérité étant accrue par des facteurs de stress y compris l'application de doses sub-létales d'herbicide (Zúñiga *et al.* 2001).

Lutte chimique

Labrada (1994) a constitué une liste des herbicides conventionnels pour la lutte contre l'herbe queue de rat. La lutte chimique sélective contre l'herbe queue de rat, a été effectivement réalisée avec quelques triazines (par exemple dimetamethrine), dinitroanilines (par exemple pendimethaline) et amides acides (par exemple diphenamid). La pendimethaline a montré une forte efficacité contre l'herbe queue de rat et peut être facilement retenue comme une tactique pour la gestion intégrée de cette mauvaise herbe en culture de maïs (Valverde *et al.* 1999b). Au Trinidad, pendimethaline (1.5 kg ha^{-1}) et le sarclage des interlignes à 14 et à 28 jours après le semis a permis de lutter efficacement contre l'herbe queue de rat dans le maïs durant la période critique d'interférence (Bridgemohan et Brathwaite, 1989). Plus récemment des graminicides systémiques qui inhibent l'acétyle coA carboxylase (aryloxy-phenoxy propanoates et cyclohexanediones) ont également été utilisés pour éliminer *R. cochinchinensis*. La mauvaise herbe a cependant développé de résistance dans un cas à fluazifop-p-butyl en culture de soja en Louisiane aux Etats-Unis (Heap, 2002). Les herbicides totaux, plus spécialement le paraquat et le glyphosate sont aussi largement utilisés pour le contrôle de *R. cochinchinensis*.

Les herbicides à base de sulfonylurée qui inhibent l'enzyme acetolactate synthase (ALS) sont maintenant commercialisés pour être utilisés pour le contrôle sélectif contre *R. cochinchinensis*. L'un des composés les plus largement utilisés à cette fin est le nicosulfuron. Par exemple il est communément utilisé en Campeche au Mexique où *R. cochinchinensis* et *Sorghum halepense*, posent particulièrement de problème dans la production du maïs (Valverde *et al.* 2001). En Louisiane, le nicosulfuron (35 g m.a. ha^{-1}) a permis de lutter contre l' herbe queue de rat en culture de maïs, mieux que le primisulfuron (39 g m.a ha^{-1}) lorsqu'il est appliqué au stade six feuilles (Strahan *et al.* 2000a). Quand nicosulfuron est formulé sous forme de granulés dispersibles, il faut lui ajouter un surfactant non ionique pour devienne actif. Le trifloxysulfuron-sodium (CGA 362622), nouvel herbicide sulfonylurée de post-levée pour le coton et la canne à sucre, combat l'herbe queue de rat en plantation de canne à sucre à 15–50 g a.i. ha^{-1} en mélange avec l'amétryne (Hudetz *et al.* 2001).

Intégration des tactiques pour la gestion de l'herbe queue de rat

Rojas *et al.* (1993a), ont conduit une étude au champ sur quatre années sur les effets de l'intégration des méthodes de lutte contre les populations de l'herbe queue de rat. L'expérimentation a été réalisée dans la zone à saison sèche du nord – ouest du Costa Rica où il y a précisément trois campagnes de culture par an : maïs, maïs ou haricot, puis une jachère en saison sèche. L'expérimentation a porté sur la gestion de l'herbe queue de rat dans le système de rotation maïs-haricots-jachère qui a commencé en 1991. Les tactiques évaluées sont la gestion de la jachère: désherbage manuel, application de paraquat (0.5 kg ha^{-1}) et non-désherbage; les pratiques de labour: sans labour et labour conventionnel (un passage de labour à disc à 20 cm de profondeur, puis deux passages à la herse) et en traitement chimique de la

culture: 1.0 kg ha^{-1} de pendimethaline plus 2.4 kg ha^{-1} d'alachlore (H1), 1.25 kg ha^{-1} de pendimethaline (H2), 1.5 kg ha^{-1} de pendimethaline (H3), puis sans méthode de lutte (H4). Les herbicides étaient appliqués en pré-levée suivant ainsi le semis des deux cultures. Les pratiques de gestion de la jachère ont été initiées durant la saison sèche de septembre 1991, avant le semis du maïs en mai 1992. Subséquemment, le maïs est semé chaque année en mai au début de la saison pluvieuse et les haricots immédiatement après la récolte du maïs en septembre. Les mauvaises conditions climatiques ont occasionné chaque année la perte de la culture de haricot. La population moyenne de l'herbe queue de rat sur le site de l'essai en septembre 1991 (avant les traitements) était de 58 plantes m^{-2}.

La densité de l'herbe queue de rat était substantiellement plus élevée dans les parcelles contrôles ou aucun traitement n'a été appliqué en période de jachère, mais l'utilisation d'herbicides sur la culture a diminué les populations de la mauvaise herbe à des niveaux similaires quelle que soit la pratique de gestion de la jachère. Les plus faibles populations de l'herbe queue de rat ont également été enregistrées dans les parcelles sans labour comparativement avec celles où le labour conventionnel a été appliqué. Les traitements des cultures avec les herbicides ont eu un plus grand effet sur les populations de l'herbe queue de rat durant le cycle de la culture et cet effet est plus grand que celui du labour et de la gestion de la jachère. La plus faible population de l'herbe queue de rat a été observée dans les parcelles ayant reçu la plus forte dose de pendimethaline. Les rendements de maïs ont toujours été plus faibles dans les parcelles sans jachère et sans méthode de lutte contre l'herbe queue de rat. Lorsqu'on a engagé tôt en saison de culture une lutte chimique contre la mauvaise herbe, les rendements étaient modérément plus élevés dans les parcelles où la gestion de la jachère a été pratiquée. Cependant, il n'y a eu aucune évidence sur l'amélioration des rendements en maïs dans les parcelles sans labour, en comparaison avec le labour conventionnel (Rojas *et al.* 1993a, Valverde *et al.* 1999b).

Les méthodes intégrées de lutte contre l'herbe queue de rat ont également été évaluées pendant trois ans sur des parcelles de validation en milieu paysan (environ 1000 m^2 chacune) dans les champs de petits paysans dans trois localités au Costa Rica (Valverde *et al.* 1999a, 1999b). Le maïs est produit deux fois par an sur deux des sites. Dans la troisième localité le système de culture est basé sur la rotation : maïs-haricots secs-jachère. Les parcelles de validation ont intégré le sans labour, l'utilisation de l'herbicide sélectif pendimethaline dans la première culture de maïs (pour baisser la densité initiale de l'herbe queue de rat), le semis de *Mucuna* spp. entre les lignes de maïs, puis la prévention de la production de graines de l'herbe queue de rat pendant la jachère. Dans les parcelles des producteurs, la lutte contre l'herbe queue de rat était basée sur la combinaison du fauchage et l'application directe de paraquat. La pendimethaline a été efficace contre l'herbe queue de rat et a permis l'installation de *Mucuna* spp. durant la première culture de maïs. Sur tous les sites les densités de l'herbe queue de rat ont été plus faibles dans les parcelles de validation que dans les champs des producteurs et les niveaux d'infestation ont baissé au cours des années avec la gestion intégrée. En général les rendements de maïs et du haricot sec ont été plus élevés dans les parcelles de validation dans toutes les localités et durant toutes les saisons de culture.

Des échantillons de carottes de sol ont aussi révélé des réductions substantielles de la banque de semences de l'herbe queue de rat dans le sol dans les parcelles de validation (Merayo *et al.* résultats non publiés). Des analyses du budget partiel ont montré que la gestion intégrée de l'herbe queue de rat est aussi économiquement faisable pour les petits paysans.

La lutte biologique contre l'herbe queue de rat avec le charbon pourrait être incorporée à une stratégie de lutte intégrée. Les dynamiques du système herbe queue de rat - charbon de sommité ont été explorées dans une approche de modélisation (Smith *et al.* 1997). Ce travail a suggéré qu'un très fort taux d'infection annuelle (plus de 85 %) serait nécessaire pour le charbon à lui seul soit efficace comme agent de contrôle. Le raffinement ultérieur du modèle en plus d'autres simulations a suggéré que le charbon, en combinaison avec une plante de couverture pourrait être hautement efficace. Une faible densité de plante de couverture plus 50% de taux d'infection de charbon conduit à 6 plantes m^{-2} dans chaque culture. Les simulations d'une haute densité de culture plus le charbon prévoient une réduction de la densité de l'herbe queue de rat de 0,1 plante m^{-2} (Smith *et al.* 2001).

BIBLIOGRAPHIE

Akanvou, R., Bastiaans, L., Kropff, M. J. & Becker, M. 2001. Characterization of growth, nitrogen accumulation and competitive ability of six tropical legumes for potential use in intercropping systems. *J. Agronomy and Crop Science* 187: 111-120.

Alves, P. L., Furtado-Bachega, M., Môro, J.R., Lemos, M.V., Dos Santos, M.A., Alves, E. C. C., Môro, F.V. 2001. Identification and characterization of itchgrass accessions. In *Abstracts of the Third Int. Weed Science Congress, 2000.* June 6-11. Foz do Iguassu, Brazil, pp. 106. CD-ROM. Available from the International Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Anaya, A. L. 1999. Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agro-ecosystems. *Critical Reviews in Plante Sciences* 18: pp. 697-739.

Anwar, A. I. 2001. Impact and management of selected alien and invasive weeds in Malaysia with some action plans instituted for biological diversity. *Proc. of the Third Int. Weed Science Congress, 2000.* June 6-11. Foz do Iguassu, Brazil, Manuscript number 446, 11 pp., CD-ROM. Available from the International Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Arevalo, R. A. & Bertoncini, E.I. 1994. *Biologia e manejo de Rottboellia exaltata L. f. na cultura da cana-de-açúcar Saccharum* spp. *Análise do problema.* Publicação Especial Centro de Cana-de-Açúcar, Piracicaba, Brasil – SP, 2, 24 pp.

Becker, M. & Johnson, D.E. 1998. Legumes as dry season fallow in upland rice-based systems of West Africa. *Biology and Fertility of Soils* 27: 358-367.

Bishundial, D.P., Dasrat., L., Lancaster, B. & Victorine, C. 1997. Management strategies for eradication of *Rottboellia cochinchinensis* at Wales Estate. *Proc. WIST 26th Conference* pp.124-127.

Black, B. D., Griffin, J.L., Russin, S. & Snow, J.P. 1996. Weed hosts for *Rhizoctonia solani*, causal agent for Rhizoctonia foliar blight of soybean (*Glycine max*). *Weed Tech.* 10: 865-869.

Bridgemohan, P. & Brathwaite, R.A.I. 1989. Weed management strategies for the control of *Rottboellia cochinchinensis* in maize. *Weed Res.* 29: 433-440.

Bridgemohan, P. & McDavid, C. R. 1993. A model of the competitive relationships between *R. cochinchinensis* and *Zea mays*. *Annals of Applied Biology* 123: 649-656.

Bridgemohan, P., Brathwaite, R.A.I., & McDavid, C. R. 1991. Seed survival and patterns of seedling emergence studies of *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton in cultivated soils. *Weed Res.* 31: 265-272.

Bridgemohan, P., McDavid, C.R., Bekele, I. & Brathwaite, R.A.I. 1992. The effects of *Rottboellia cochinchinensis* on the growth, development and yield of maize. *Tropical Pest Management* 38: 400-407.

Buckles, D. & Triomphe, B. 1999. Adoption of mucuna in the farming systems of northern Honduras. *Agroforestry Systems* 47: 67-91.

Caamal-Maldonado, J. A., Jimenez-Osornio, J.J., Torres-Barragan, A. & Anaya, A.L. 2001. The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agronomy J.* 93: 27-36.

Calvo G., Merayo, A. & Rojas, C. E. 1996. Diagnóstico de la problemática de la caminadora (*Rottboellia cochinchinensis*) en dos zonas productoras de maíz de la provincia de Guanacaste, Costa Rica. *Manejo Integrado de Plagas* 41: 50-52.

Capo-chichi, L.J.A., Weaver, D.B. & Morton, C.M. 2001. AFLP assessment of genetic variability among velvetbean (*Mucuna* sp.) accessions. *Theoretical and Applied Genetics* 103: 1180-1188.

Carangal, V. R., Rebancos, E. T. Jr., Armada, E.C. & Tengco, P.L. 1994. Integration of food, forage, and green manure production systems. pp. 51–65 *In* J.K. Ladha, & Garrity, D.P. eds. *Green manure production systems for Asian ricelands.* IRRI, Manila.

Carsky, R. J., Oyewole, B. & Tian, G. 2001. Effect of phosphorus application in legume cover crop rotation on subsequent maize in the savanna zone of West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59: 151-159.

Casini, P., Vecchio, V. & Tamantini, I. 1998. Allelopathic interference of itchgrass and cogongrass: Germination and early development of rice. *Tropical Agriculture* 75: 445-451.

Chikoye, D., Manyong, V.M., Carsky, R.J., Ekeleme, F., Gbehounou, G. & Ahanchede, A. 2002. Response of speargrass (*Imperata cylindrica*) to cover crops integrated with hand-weeding and chemical control in maize and cassava. *Crop Protection* 21: 145-156.

Chikoye D., Manyong, V.M. & Ekeleme, F. 2000. Characteristics of speargrass (*Imperata cylindrica*) dominated fields in West Africa: crops, soil properties, farmer perceptions and management strategies. *Crop Protection* 19: 481-487.

De la Cruz, R., Rojas, C.E. & Merayo, A. 1994. Uso de leguminosas de cobertura para el manejo de la caminadora (*Rottboellia cochinchinensis*) durante el ciclo de cultivo del maíz y el período de barbecho en el trópico seco en Costa Rica. *Manejo Integrado de Plagas* 31: 29-35.

Ellison, C. A. 1987. *Preliminary studies to assess the potential of fungal pathogens for biological control agents of the graminaceous weed Rottboellia cochinchinensis (Lour.)* Clayton. Imperial College, University of London. (M.Sc. thesis)

Ellison, C. A. 1993. *An evaluation of fungal pathogens for biological control of the tropical graminaceous weed Rottboellia cochinchinensis,* University of London. (Ph.D. thesis)

Ellison, C. A., Evans, H.C. 1992. Present status of the biological control programme for the graminaceous weed *Rottboellia cochinchinensis*. *Proc. of the Eighth Int. Symposium on Biological Control of Weeds.* Lincoln University, Canterbury, New Zealand eds. Delfosse, E. S & Scott, R. R). DSIR/CSIRO: Melbourne, pp. 493-500.

FAO. 1992. *Memoria Taller Regional Manejo de la Maleza Caminadora Rottboellia cochinchinensis (Lour.) Clayton. Managua (Nicaragua).* 18-22 May 1992. FAO Dept. de Agricultura, Rome (Italy). 23 pp.

Fisher, H. H., Lopez, F., Margate, Elliot, P. & Burrill, L. 1985. Problems in control of *Rottboellia exaltata* L.f. in maize in Bukidnon Province, Mindanao, Philippines. *Weed Res.* 25: 93-102.

Fisher, H. H., Menendez, R. A., Daley, L. S., Robb-Spencer, D., Crabtree, G. D. (1987). Biochemical characterization if itchgrass (*Rottboellia exaltata*) biotypes. *Weed Sci.* 35: 333-338.

Fujii, Y., Shibuya, T., & Usami, Y. 1991. Allelopathic effect of *Mucuna pruriens* on the appearance of weeds. *Weed Res.* (Japan) 36: 43-49.

Fujisaka, S., Escobar, G. & Veneklaas, E.J. 2000. Weedy fields and forests: interactions between land use and the composition of plante communities in the Peruvian Amazon. *Agriculture Ecosystems and Environment* 78: 175-186.

Hall, D. W. & Patterson, D.T. 1992. Itchgrass: Stop the trains. *Weed Tech.* 6: 239-241.

Heap, I. 2002. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds (available at www.weedscience.com)

Herrera, F. 1989. Situación de *Rottboellia cochinchinensis* en Costa Rica. In *Seminario taller sobre Rottboellia cochinchinensis y Cyperus rotundus. Distribución, problemas y impacto económico en Centroamérica y Panamá.* Proyecto MIP-CATIE, Honduras, 14 pp.

Holm, L. G., Plucknett, D.L., Pancho, J.V. & Herberger, J.P. 1977. *The World's Worst Weeds, Distribution and Biology*. University Press of Hawaii, Honolulu, pp.139-145.

Hudetz, M., Kreuz, K., Steinemann, A., Boutsalis, P., Ruegg, W., Wells, J. & Soares, J.E. 2001. CGA 362622 uptake, translocation and metabolism in cotton and sugarcane [abstract]. In A*bstracts of the Third Int.Weed Science Congress, 2000.* June 6-11, Foz do Iguassu, Brazil, 124 pp. CD-ROM available from the International Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Huelma, C C., Moody, K. & Mew, T. W. 1996. Weed seeds in rice shipment: a case study. *Int. J. Pest Management* 42, 147-150.

Jiménez, J. M., Bustamante, E., Gómez, R. & Pareja, M. 1990. La pudrición de la espiga de la caminadora *Rottboellia cochinchinensis*, su etiología y posible uso como agente de combate biológico. *Manejo Integrado de Plagas* 15: 13-33.

Kirchhof, G. & Salako, F.K. 2000. Residual labourage and bush-fallow effects on soil properties and maize intercropped with legumes on a tropical Alfisol. *Soil Use and Management* 16: 183-188.

Labrada, R. 1994. *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton. pp.74-77 *In* Labrada, R., Caseley, C. & Parker, C. eds. *Weed management for developing countries*. FAO Plante Production and Protection Paper 120, FAO, Rome.

Lencse, R. J. & Griffin, J. L. 1991. Itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*) interference in sugarcane (*Saccharum* sp.). *Weed Tech.* 5: 396-399.

Maillet, J. 1991. Control of grassy weeds in tropical cereals. In *Tropical Grassy Weeds*. (eds. Baker, F.W.G. and Terry P.J.). CAB International, Wallingford, Oxon, U.K., pp.112-143.

Maldonado, R. 2000. Fundamentales malezas problemas en caña de azúcar. pp.2-6 *In* Díaz, J.C., ed. *Curso de control integral de malezas en caña de azúcar 2000.* Ministerio del Azúcar, Cuba.

Merayo, A., Rojas, C. E., Valverde, B.E. & Umaña, E. 1998. Leguminosas de cobertura para el manejo de *Rottboellia cochinchinensis* en el asocio yuca/maíz. *Manejo Integrado de Plagas* 48, 49-53.

Millhollon, R. W. & Burner, D.M. 1993. Itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*) biotypes in world populations. *Weed Sci.* 41, 379-387.

Oben, V. O., Amusa, N.A. & Ezenwa, I. 1997. Foliar blight in *Centrosema pubescens* (Benth.) in southwestern Nigeria. *Mycopathologia* 138: 47-50.

Obi, M. E. 1999. The physical and chemical responses of a degraded sandy clay loam soil to cover crops in southern Nigeria. *Plante and Soil* 211: 165-172.

Pamplona, P. P. & Mercado, B.L. 1981. Ecotypes of *Rottboellia exaltata* L.f. in the Philippines I. Characteristics and dormancy of seeds. *Philippine Agriculturist* 64: 59-66.

Patterson, D., T., Meyer, C.R., Flint, E.D. & Quimby, P.C., Jr. 1979. Temperature responses and potential distribution of itchgrass (*Rottboellia exaltata*) in the United States. *Weed Sci.* 27: 77-82.

Rahman, M. A. & Price, C.E. 2001. *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton competition with sugar cane. *Proc. of the Third Int. Weed Science Congress, 2000,* June 6-11; Foz do Iguassu, Brazil, Manuscript number 156, 16 pp. CD-ROM available from International Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Reeder, R. H. & Ellison, C.A. 1999. Estado actual de la investigación en control biológico clásico de la *Rottboellia cochinchinensis* con el carbón *Sporisorium ophiuri*: potencial y riesgos. pp. 101-135. *In* Sánchez, V., ed. *Control biológico de Rottboellia cochinchinensis*. Centro Agronómico Tropical de Enseñanza (CATIE), Informe Técnico No. 308, Turrialba, Costa Rica.

Reeder, R H., Ellison, C.A. & Thomas, M.B. 1996. Population dynamic aspects of the interaction between the weed *Rottboellia cochinchinensis* (itch grass) and the potential biological control agent *Sporisorium ophinri* (head smut). *Proc. of the IX[th] Int.Synposinm on Biological Control of Weeds.* University of Cape Town, South Africa, eds. Moran, V. C. & Hoffman, J. H., pp. 205-211.

Rojas, C. E., Merayo, A. & de la Cruz, R. 1992. Determinación de posibles ecotipos de *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton en varias zonas ecológicas de Costa Rica. *Manejo Integrado de Plagas,* 24-25, 22-25.

Rojas, C. E., de la Cruz, R., Shannon, P.J. & Merayo, A. 1993a. Study and management of itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis* in the pacific region of Costa Rica. *Proc. Brighton Crop Conference Weeds-1993*, 1183-1188

Rojas, C. E., de la Cruz, R. & Merayo, A. 1993b. Efecto competitivo de la caminadora *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton en el cultivo del maíz (*Zea mays* L.). *Manejo Integrado de Plagas* 27, 42-45.

Rojas, C. E, Merayo, A. & de la Cruz, R. 1993c. Comportamiento de posibles ecotipos de *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton bajo condiciones de campo. *Manejo Integrado de Plagas* 28, 30-32.

Rojas, C. E., de la Cruz, R. & Merayo, A. 1994. La profundidad y duración en el suelo de la semilla de caminadora (*Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton) y su efecto sobre la viabilidad y persistencia en el trópico seco. *Manejo Integrado de Plaga* 32: 25-29.

Sharma, D. & Zelaya, O. 1986. Competition and control of itchgrass (*Rottboellia exaltata*) in maize (*Zea mays*). *Tropical Pest Management* 32: 101-104.

Smith, M. C., Valverde, B.E., Merayo, A. & Fonseca, J.F. 2001. Integrated management of itchgrass in a corn cropping system: Modelling the effect of control tactics. *Weed Sci.* 49: 123-134.

Smith, M.C., Reeder, R. H. & Thomas, M. (1997). A model of the biological control of *Rottboellia cochinchinensis* with the head smut *Sporisorium ophinri*. *J. Applied Ecology* 34, 388-398.

Strahan, R. E., Griffin, J.L., Jordan, D.L. & Miller, D.K. 2000a. Influence of adjuvants on Itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*) control in corn (*Zea mays*) with nicosulfuron and primisulfuron. *Weed Tech.* 14: 66-71.

Strahan, R. E., Griffin, J.L., Reynolds, D.B. & Miller, D.K. 2000b. Interference between *Rottboellia cochinchinensis* and *Zea mays*. *Weed Sci.* 48: 205-211.

Tarawali, G., Manyong, V.M., Carsky, R.J., Vissoh, P.V., Osei-Bonsu, P. & Galiba, M. 1999. Adoption of improved fallows in West Africa: lessons from mucuna and stylo case studies. *Agroforestry Systems* 47: 93-122.

Tarawali, G. & Ogunbile, O.A. 1995. Legumes for sustainable food production in semi-arid savannahs. *ILEIA Newsletter* 11: 18-23. (not read.)

Thomas, P.E.L. & Allison, J.C.S. 1975. Seed dormancy and germination in *Rottboellia exaltata*. *J. Agricultural Sci.* 85: 129-134.

Tian, G.G.O., Kolawole, B., Kang, T. & Kirchhof, G. 2000. Nitrogen fertilizer replacement indexes of legume cover crops in the derived savanna of West Africa. *Plante and Soil* 224: 287–296.

Tucuch, F. M. 1991. *Estudio de la fenologia y caracteristicas reproductivas del zacate peludo* (*Rottboellia cochinchinensis*) *en el estado de Campeche.* Series Técnicas de ASOMECIMA, Asociación Mexicana de la Ciencia de la Maleza 1: 7-10.

Valverde, B. E., Merayo, A., Rojas, C. E. & Alvarez, T. (1995). Interaction between a cover crop (*Mucuna* sp.), a weed (*Rottboellia cochinchinensis*) and a crop (maize). *Proc. Brighton Crop Conference Weeds-1995*, 197-200

Valverde, B.E., Merayo, A., Fonseca, J. F., Alvarez, T. & Riches, C.R (1999a). Validation of integrated methods to control itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*) in corn with subsistence growers in Costa Rica. *WSSA Abstracts* 39: 308.

Valverde, B. E., Merayo, A., Reeder, R. & Riches, C.R. 1999b. Integrated management of itchgrass (*Rottboellia cochinchinensis*) in maize in seasonally dry Central America:

Facts and perspectives. *Proc. Brighton Crop Protection Conference - Weeds*, Brighton, U.K., pp. 131-140.

Valverde, B. E., Riches, C.R., Merayo, A. & Torres, G. 2001. Distribution and importance of *Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) Clayton in maize production in Mexico [abstract]. In *Abstracts of the Third Int.Weed Science Congress, 2000.* June 6-11. Foz do Iguassu, Brazil, pp. 207-208. CD-ROM available from the International Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Valle, A., Borges, V.F. & Rincones, C. 2000. Principales malezas en cultivos de caña de azúcar en el municipo Unión del estado Falcon, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia 17: 51-62.*

Vargas-Acosta, J. 1993. *Diagnóstico preliminar sobre la distribución de Rottboellia cochinchinensis (Lour.) Clayton en las planteaciones de caña de azúcar de Costa Rica.* Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. San José, 31 pp.

Zhang, W. M. & Watson, A.K. 1997. Host range of *Exserohilum monoceras*, a potential bioherbicide for the control of *Echinochloa species*. *Canadian J. Botany* 75: 685-692.

Zúñiga, C., Sánchez-Garita, V. & Bustamante, E. 2001. Predisposición de *Rottboellia cochinchinensis* al ataque de patógenos nativos en respuesta a factores de estrés. *Manejo Integrado de Plagas* 59: 27-33.

Zúñiga, C., Sánchez-Garita, V. & Bustamante, E. 2000. Selección de patógenos nativos de Costa Rica para el control biológico de *Rottboellia cochinchinensis*. *Manejo Integrado de Plagas* 57: 49-53.

Caractéristiques et gestion de *Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel dans les petites fermes dans les pays en développement

David Chikoye

INTRODUCTION

Imperata cylindrica (L.) Raeuschel, également connu sous les noms de chiendent en Afrique de l'Ouest, alang-alang en Asie, et cogongrass en Amérique, est une mauvaise herbe pérenne pernicieuse d'une grande importance dans les zones tropicales et subtropicales, de même que dans les parties chaudes des régions tempérées du monde (Holm *et al.* 1977; Garritty *et al.* 1997). Dans ces écologies *I. cylindrica* pousse dans une large gamme d'habitats qui comprennent les forêts dégradées, les prairies, les terres arables et les jeunes plantations. Normalement, cette graminée ne pousse pas dans les forêts touffues mais elle apparaît fréquemment en quelques années, une fois que les forêts sont entamées pour l'agriculture ou pour le bois (Ivens, 1980). *I. cylindrica* est considéré comme la pire des mauvaises herbes en Asie du sud Est et dans la savane humide de l'Afrique de l'Ouest (Garriety *et al.* 1997; Terry *et al.* 1997). Il a été classé comme la dixième mauvaise herbe la plus redoutée dans le monde et qui affecte les paysans qui pratiquent l'agriculture sur brûlis (Holm *et al.* 1977) et compte parmi les neuf espèces de mauvaises herbes qui demandent des efforts supplémentaires au-delà de ceux fournis pour le contrôle des autres mauvaises herbes. Elle est nocive à cause de sa large distribution et son adaptation à une large gamme de conditions climatiques et de sols, sa forte capacité compétitive avec plusieurs cultures et sa résistance aux méthodes de lutte. Des technologies pour combattre *I. cylindrica* ont été développées mais très peu ont été adoptées par les petits fermiers (Brook, 1989, Townson, 1991, Terry *et al.* 1997). La présente courte revue traite des caractéristiques biologiques de *I. cylindrica* qui ont des implications pour les stratégies de son contrôle et énumère les progrès de la recherche et les options de gestion dans les petites exploitations des pays en développement.

IMPORTANCE ECONOMIQUE

Les effets néfastes de *I. cylindrica* sur les cultures sont bien documentés (Holm *et al.* 1977; Townson, 1991). Il affecte négativement la croissance des tecks, cacaoyers, kolatiers, caféiers, anacardiers, palmiers à huile, cocotiers, hévéa et *Gmelina arborea* (Komolafe, 1976; Holm *et al.* 1977; Townson, 1991). Les rendements des cultures annuelles sont sévèrement réduits par la compétition de *I. cylindrica*. Il a causé la réduction des rendements de 51 à 62 % dans le maïs lorsque le sarclage a été effectué 2 à 4 fois (Akobundu et Ekeleme, 2000). Des pertes plus élevées de rendements en grains de maïs (80–100 %) ont également été rapportées (Koch *et al.* 1990; Udensi *et al.* 1999). La perte complète de cultures se produit lorsqu'elles sont produites dans des parcelles fauchées et sans aucune autre forme de désherbage. Dans le cas du manioc des pertes de rendement de 50 à 90 % ont été signalées (Koch *et al.* 1990; Chikoye *et al.* 2001). Dans le soja, Avav (2000), a signalé des pertes de rendement de 29 à 53 % dans la région centrale de Nigeria.

En plus des pertes de rendement des cultures, *I. cylindrica* augmente le coût de production, réduit la valeur marchande des plantes à racines et tubercules endommagées et augmente les risques de feu de brousse dans les cultures pérennes, les plantations et les réserves de forêt. Il brûle facilement même étant encore vert, détruisant d'autres végétations lorsqu'il régénère très rapidement à partir de ses rhizomes souterrains éliminant ainsi d'autres espèces. Les feux de brousses récurrents durant la saison sèche causent de considérables pertes en matières organiques, ce qui entraîne la dégradation du sol. Il réduit la taille des fermes à celle qui peut

être désherbée de façon adéquate par la main-d'oeuvre disponible. Les blessures mécaniques à la peau que causent les jeunes plantules issues du rhizome réduisent l'efficacité des semis, l'application des fertilisants, le tuteurage, le sarclage et la récolte dans les zones fortement infestées, conduisant à une augmentation de la main d'œuvre et à des abandons de terre (Holm *et al.* 1977; Terry *et al.* 1997).

CARACTERISTIQUES DE *I. CYLINDRICA*

Townson (1991) et Terry *et al.* (1997) ont passé en revue les caractéristiques biologiques qui confèrent à *I cylindrica* ses capacités de réussite. Il présente une large variabilité génétique qui lui permet de s'adapter à une large gamme de conditions écologiques et de gestion. Il dispose de cinq variétés taxonomiques dont var. *major* en Asie et var. *africana* en Afrique de l'Ouest sont les plus redoutables. *I cylindrica* se reproduit sexuellement par les graines et végétativement par les rhizomes. La floraison survient couramment après une exposition à un stress comme le feu de brousse, le surpâturage, la sécheresse ou des fauchages répétés. Il peut produire jusqu'à 3000 graines qui ont peu ou pas de phase de dormance et qui peuvent demeurer viables pendant plus d'un an (Santiago, 1965). La nature envahissante et agressive de *I. cylindrica* est attribuée à ses rhizomes. Ceux-ci sont normalement concentrés dans les 15 à 20 premiers centimètres du sol où ils peuvent être en dormance mais viables pendant longtemps (Ivens, 1980). Les rhizomes ont une forte capacité de régénération à cause de leurs nombreux bourgeons qui développent rapidement des rejets qui sont de jeunes pousses à la suite des fragmentations occasionnées par le labour ou autre moyen de perturbation. Les rhizomes résistent au feu à cause de leur localisation profonde dans le sol. Cet enfouissement profond dans le sol permet à *I. cylindrica* d'être très résistant à la plupart des stratégies de luttes (Holm *et al.* 1977; Ivens, 1980). La capacité des fragments de rhizomes de régénérer diminue avec la réduction de la longueur des segments. Les rhizomes plus longs ont plus de chance de donner des rejets parce que qu'ils ont plus de réserves d'hydrates de carbone que les rhizomes courts (Ivens, 1975).

I. cylindrica peut pousser sur des sols avec une large gamme de teneur en éléments nutritifs, d'humidité et de pH (Santoso *et al* 1997). Bien qu'il ait été rapporté qu'il est une mauvaise herbe des sols pauvres, *I. cylindrica* domine probablement ces endroits à cause du manque de compétition avec d'autres espèces de plantes qui ne peuvent pas survivre sur des terres marginales (Santoso *et al.* 1997). C'est un faible compétiteur et facilement supprimé par d'autres espèces sur des sols fertiles (Eussen et Wirjahardja, 1973). Il ne tolère pas les endroits ombragés car il a une photosynthèse de type C4 (Paul et Elmore, 1984). C'est un grand compétiteur pour les facteurs de croissance tels que l'eau, les éléments nutritifs et la lumière parce qu'il bourgeonne et pousse plus rapidement que la plupart des cultures (plantes de type C3).

I. cylindrica réussit très bien dans les endroits fréquemment brûlés, sur pâturés ou intensivement cultivés. Le feu reste le moyen le moins cher pour le nettoyage des forêts pour les activités agricoles. Le feu de brousse accroît la fertilité du sol pour une courte période. Le feu est utilisé pour enlever l'excès de végétaux dans les systèmes de culture sur brûlis. Les paysans éleveurs brûlent les prairies afin de stimuler la repousse des jeunes herbes pour leurs troupeaux, tandis que les chasseurs utilisent le feu pour dénicher les animaux en cachette dans les forêts et dans les prairies. Les feux deviennent souvent incontrôlables et s'étendent à d'autres endroits où ils causent des dommages sociaux telle que la dégradation du sol. Les feux détruisent seulement les feuilles de *I. cylindrica;* après le feu, il développe à nouveau des rejets, produit des jeunes pousses et fleurit. Le feu détruit aussi d'autres espèces végétales qui autrement seraient entrées en compétition avec *I. cylindrica.* Les rhizomes sont résistants au feu et sont le premier moyen de pérennisation (Wibowo *et al.* 1997).

LES STRATEGIES DE GESTION

Les méthodes de lutte contre *I. cylindrica* ont été extensivement passées en revue par Brook (1989), Townson (1991), Terry *et al.* (1997) et d'autres. L'objectif clé de toute stratégie de gestion devrait être la destruction des rhizomes qui sont les principaux organes par lesquels la mauvaise herbe se pérennise et se répand. Les stratégies de lutte devraient également être basées sur une approche intégrée, vu qu'aucune méthode à elle seule ne peut être efficace de façon durable contre *I. cylindrica*. La technique de lutte contre *I. cylindrica* a été développée et utilisée avec succès dans de grands domaines ou sur des fermes commerciales où il y a ample disponibilité de la main d'œuvre, des capitaux et des herbicides. Cependant, les niveaux d'adoption par les petits paysans sont toujours faibles. Des stratégies de gestion ont été sélectionnées et résumées plus bas.

La prévention/contrôle du feu

La prévention des feux ou leur contrôle est un facteur important pour les prairies dominées par *I. cylindrica* car cela accélère la vitesse de la succession naturelle de végétation qui aboutit à la forêt secondaire qui à terme ombragerait puis supprimerait cette mauvaise herbe. La prévention des feux de brousse et la suppression des feux ayant démarré pourront permettre de réduire l'action des feux. Les plans de prévention des feux devraient normalement cibler les populations du fait qu'elles sont à l'origine de la plupart des feux. Ces plans peuvent être basés sur l'éducation et les mesures coercitives (Anon. 1996). L'éducation pourrait augmenter la prise de conscience sur les raisons pour lesquelles il faut éviter les feux et former les populations sur les pratiques de prévention. Les mesures coercitives vont permettre d'assurer que les populations vivant dans les zones en proie aux incendies se conforment aux réglementations et codes des incendies. Wibowo *et al.* (1997) ont suggéré que les stratégies de prévention des feux à travers l'éducation et la mise et les mesures coercitives devraient être développées et appliquées aux niveaux des champ/fermes, de la communauté et du gouvernement. Au niveau champ/ferme, l'usage des pare-feux effectués par le nettoyage des herbes par fauchage, labour et le contrôle des feux peuvent permettre de prévenir l'extension des incendies à de grandes étendues. Dans les domaines agro-forestiers, ceci pourrait être atteint en mettant les cultures vivrières entre les arbres. Les institutions communautaires et du gouvernement devraient être plus concernées par la mise en exécution des codes du feu, les réglementations et les campagnes de sensibilisation. Dans l'agriculture à faible niveau d'intrants basée sur le brûlis, il est nécessaire de développer des moyens moins chers pour enlever la végétation autre que le brûlis.

Fauchage/coupe

Le fauchage suivi du brûlis est une pratique courante pour détruire le feuillage de *I. cylindrica* des champs avant le labour ou le semis. Pour que le fauchage soit efficace et épuiser les réserves d'hydrates de carbone dans le rhizome, le fauchage devrait être répété à intervalles réguliers. Par exemple, Soerjani (1970) a suggéré un intervalle de 2 semaines durant une période de trois ans. Le fauchage exige de la main d'œuvre, de l'ordre de 75 hommes jours/ha et ne peut donc pas être appliqué pour les grandes superficies (Brook, 1998). Le fauchage répété induit aussi la floraison et peut donc faciliter la dissémination de la mauvaise herbe. Le fauchage devrait être intégré avec d'autres options de façon à réduire la quantité de main d'œuvre qu'il exige.

Pressage/aplanissement

Le pressage est effectué par couchage des chaumes d'*I. cylindrica* à même le sol. Si les chaumes sont hautes (1 m ou plus), leur propre poids aide à les garder couchées sur le sol (Terry *et al.* 1997). Dans la région centrale du Nigéria, les paysans couchent les chaumes de *I.*

cylindrica au début de la saison des pluies suivi immédiatement d'un labour superficiel permettant de mettre la terre sur les plantes pour les maintenir couchées. Le labour est effectué quatre semaines plus tard pour couvrir complètement les feuilles et les rhizomes (T. Avav, communication personnelle). La repousse de *I. cylindrica* après aplatissement sur le sol est 20 à 60% plus faible qu'après fauchage et cela est moins coûteux et plus rapide que le fauchage. Cela réduit les risques de feux et facilite l'installation des plantes de couverture. Le pressage peut être effectué en utilisant des planches, des troncs d'arbres ou des tonneaux (Friday *et al.* 1999).

Le labour

Si le labour n'est pas précédé de fauchage ou du brûlis, il a pour rôle d'anéantir le feuillage, de même il permet d'endommager les rhizomes et d'empêcher l'émergence de jeunes pousses par la fragmentation, la dessiccation et un enfouissement profond. Le labour devrait avoir une profondeur d'environ 30 à 40 cm, étant donné que la plupart des rhizomes se trouvent au dessus de cette profondeur. Les rhizomes devraient être cassés en fragments aussi petits que possible et enfouis aussi profondément que possible. Ivens (1975), a rapporté que les fragments de rhizomes de 2 à 3 nœuds n'ont pas pu bourgeonner et que 77 à 84% de ceux-ci ont pourri deux mois après leur plantation à 7,5cm de profondeur. Des segments de rhizome plus longs exigent d'être enfouis jusqu'à 20 cm de profondeur. De nombreuses opérations de labour peuvent être nécessaires pour un contrôle total. Cela dépendra des conditions qui prévalent et des autres options de lutte disponibles. Par exemple, Terry *et al.* (1997) ont recommandé que deux labours à disque croisés à angle droit soient effectués à une profondeur de 30 à 40 cm à un intervalle de deux semaines, suivi de deux hersages à deux semaines d'intervalle. Le labour est meilleur lorsqu'il est effectué en début de la saison sèche au moment où l'essentiel de la biomasse des plantes se trouve dans les rhizomes et la dessiccation plus efficace (Terry *et al.* 1997). Dans les cultures à racines et tubercules en Afrique de l'Ouest, les paysans font normalement les sillons ou les buttes dans leurs champs à la fin de la saison des pluies (Octobre et Novembre) pendant que le sol est mou. Cette opération fragmente les rhizomes en petits morceaux et les met à la surface du sol où ils sont desséchés par le soleil durant une période de 4 à 5 mois; ce qui réduit généralement la ré-infestation au cours de la saison pluvieuse subséquente (T. Avav, communication personnelle). Dans les petites fermes, l'essentiel des opérations de labour se fait à la houe ou par des charrues tirées par des bœufs tandis que dans les fermes commerciales le labour est effectué à l'aide du tracteur. Les inconvénients dans la lutte contre *I. cylindrica* par le labour sont : (i) le labour manuel à la houe est laborieuse et n'affecte pas les rhizomes; (ii) cela nécessite un longue période avant d'avoir un niveau de contrôle acceptable; (iii) il faut répéter l'opération plusieurs fois ; et (iv) c'est une technique coûteuse qui peut entraîner l'érosion du sol (Townson, 1991; Terry *et al.* 1997).

La lutte chimique

Plusieurs revues de littérature sur l'utilisation des herbicides pour lutter contre *I. cylindrica* sont disponibles (Brook, 1989; Townson, 1991; Terry *et al.* 1997). Les herbicides sont rapides et efficaces et perturbent moins le sol dans les endroits où l'on redoute l'érosion (Townson, 1991). Plusieurs herbicides ont été testés seuls (par exemple, paraquat, fluazifop-butyl, glufosinate-ammonia, dalapon, imazapyr, glyphosate, sulfometuron, nicosulfuron, et rimsulfuron) ou en mélange pour la lutte contre *I. cylindrica*. Peu d'entre eux ont montré une efficacité plus ou moins bonne, selon la dose d'application, le climat et le type de sol. Les applications répétées ou séquentielles sont souvent nécessaires pour une lutte efficace contre *I. cylindrica*. L'imazapyr et le glyphosate apparaissent comme étant les herbicides les plus prometteurs pour lutter contre *I. cylindrica* à cause de leur capacité de translocation jusqu'aux rhizomes. L'imazapyr à 0.5 –1.0 kg/ha et le glyphosate à 1.0–1.8 kg/ha permettent un bon

contrôle, persistant jusqu'à 12 mois, mais cela dépend du type de sol, du taux d'application et des conditions de l'environnement (Udensi *et al.* 1999; Terry *et al.* 1997). La longue persistance de l'imazapyr dans le sol peut être intéressante dans les plantations, mais pas dans les cultures annuelles où il inhibe le développement des plantes vivrières. Le glyphosate est le produit chimique le plus largement utilisé pour la lutte chimique contre *I. cylindrica* dans le monde. Il peut être intéressant pour les petits paysans parce qu'il dispose de peu ou pas d'activité sur le sol et donc pas d'effets résiduels sur les cultures semées après son application. De plus, son efficacité ne dépend pas du volume apporté, donc il peut être appliqué en utilisant des « essuyeurs d'herbes » ou en pulvérisations à bas ou à haut volumes. Après l'application du glyphosate un désherbage supplémentaire est souvent nécessaire dans la culture afin d'enlever les pousses qui échappent à l'application pré-semis initiale. Diverses innovations dans les techniques d'application ont également été évaluées afin d'augmenter l'efficacité de plusieurs herbicides. Elles comprennent l'usage des adjuvants, les pulvériseurs à bas et ultra bas volume et des « essuyers à corde ». Les résultats sont variables et parfois contradictoires. Malgré les nombreux avantages du glyphosate, il souffre de certains inconvénients du fait que son coût est relativement élevé par rapport à d'autres herbicides, et aussi il exige une période de six heures sans pluie après son application. Le fluazifop-butyl (fusillade) est une option de lutte en pré-levée dans le soja. Par exemple; à 0.375 kg/ha il contrôle *I. cylindrica* de 51 à 83% dans le soja ; ce qui est comparable à l'application en pré-levée du glyphosate à 2.16 kg/ha au Nigeria (Avav, 2000). Shilling et Gaffney (1995), ont rapporté que fluazifop-butyl a supprimé *I. cylindrica* pour seulement trois mois. Dans le maïs, l'application post-levée de nicosulfuron a donné un bon résultat à 70–400 kg/ha en Afrique de l'Ouest (A. F. Lum, communication personnelle). L'utilisation des herbicides nécessite des fonds pour acheter les pulvériseurs, les herbicides, de nouvelles aptitudes et un encadrement technique; tout ceci n'étant pas disponible pour les petits paysans. L'unique option des paysans est l'utilisation des méthodes qui nécessitent la main d'œuvre; ce qui est pénible, et praticable seulement sur de petites superficies.

Pratiques de gestion basées sur l'ombrage

I. cylindrica est sensible à l'ombre et donc il meurt souvent lorsqu'il est soumis à l'ombrage sur une longue période. Il peut prendre 8 à 10 ans pour mourir et être remplacé par la forêt naturelle (Dalziel et Hutchinson, 1937). Cette sensibilité à l'ombrage peut être exploitée pour sa gestion en utilisant les plantes de couverture, les arbustes et les arbres à croissance rapide. L'usage des jachères plantées pour supprimer *I. cylindrica* a été rapporté de manière extensive par Koch *et al.*1990; Anon. 1996; Macdicken *et al.* 1997; Akobundu *et al.* 2000; Chikoye *et al.* 2001 et autres. Les espèces prometteuses comprennent *Mucuna* spp., *Calapogonium mucunoides, Centrosema pubescens, Pueraria* sp., *Lablab purpureus, Psophocarphus palustris, Stylosanthes guyanensis, Cajanus cajan, Crotalaria* spp. et *Moghania macrophylla.* Les *Mucuna* spp. sont prééminentes parmi les plantes à couverture qui sont promues pour étouffer les mauvaises herbes, en particulier en Afrique de l'Ouest, à cause de leur facile installation, leur croissance rapide et leur production élevée de biomasse. Les importantes leçons à tirer des expériences dans l'utilisation des plantes de couverture en Afrique de l'Ouest sont les suivantes :

- Certaines plantes de couverture ont besoin d'être désherbées jusqu'à ce qu'elles forment une couverture qui permette de supprimer les mauvaises herbes.
- Des variations s'observent au sein et entre plantes de couverture pour leurs aptitudes à supprimer *I. cylindrica* (Chikoye and Ekeleme, 2001).
- Les avantages (réduction de la pression des mauvaises herbes) sont obtenus après un à trois saisons ou années de développement des plantes de couverture; ceci étant influencé par la localité, le type et l'accession des plantes de couverture (Chikoye *et al.* 2002).
- Les investissements en main d'œuvre pour le désherbage des cultures suivantes peuvent être réduits de plus de 50% (Akobundu *et al.* 2000).

- Les plantes de couverture ne sont efficaces que si les émondes ne sont pas brûlées par les feux de brousse en saison sèche.
- L'effet d'étouffement des plantes de couverture sur *I. cylindrica* est parfois aussi efficace que le glyphosate à 1.8 kg/ha (Udensi *et al.* (1999).
- La lutte chimique est moins coûteuse que l'usage des plantes de couverture dans les endroits ou la main d'œuvre est rare (Chikoye *et al.* 2002.
- Les rendements des cultures produites après les légumineuses de couverture sont souvent plus élevés que ceux des parcelles sans plantes de couverture suite à la réduction de la pression des mauvaise herbes et probablement l'augmentation de la teneur du sol en azote et l'amélioration de la capacité de rétention en eau (Chikoye *et al.* 2002).

Malgré les avantages avérés des plantes de couverture vis à vis de *I. cylindrica*, la technologie n'est toujours pas encore largement adoptée par les paysans, mis à part certaines régions du Bénin, en Afrique de l'Ouest. Quelques facteurs qui empêchent l'adoption de *Mucuna* spp. sont:

- Il n'éradique pas complètement *I. cylindrica;*
- Les repousses spontanées peuvent étouffer les cultures entraînant de sérieuses pertes de rendements ;
- Rareté de terre et le régime foncier ;
- Toxicité des graines pour la consommation humaine et animale ;
- Destruction des émondes accumulées par les feux de brousse pendant la saison sèche, et
- Impossibilité d'associer le *Mucuna* spp. avec les cultures basses tels que le niébé et l'igname.

Par ailleurs l'utilisation répétée de *Mucuna* spp. sur le même sol peut occasionner une résurgence de ravageurs et de maladies (Vissoh *et al.* 1998).

La culture en couloir est un système agroforestier dans lequel les cultures vivrières sont produites dans les allées formées par les rangées d'arbres ou arbustes (Kang *et al.* 1981). Les paysans peuvent aisément adopter cette technologie car elle maintient les caractéristiques de base d'une jachère sauvage tels que le recyclage des éléments nutritifs et la suppression des mauvaises herbes. Comme exemples d'arbres et d'arbustes qui ont été testés pour les cultures en couloir, on peut citer : *Gliricidia sepium, Gliricidia maculata, Leucaena leucocephala, Flemingia congesta, Senna siamea, Alchornea cordifolia, Acioa barteri, Gmelina arborea*, et *Peltophorum pterocarpum*. Un certain nombre de chercheurs ont rapporté l'efficacité de la culture en couloir contre *I. cylindrica* et d'autres mauvaises herbes (Aken'Ova et Atta-Krah, 1986; Anoka *et al.* 1991). Par exemple, Anoka *et al.* (1991) ont soutenu qu'après l'ombrage pendant deux années par des rangées de *Gliricidia sepium* et de *Leucaena leucocephala*, la biomasse aérienne de *I. cylindrica* a diminué de l'ordre de 78 à 81% pendant que la réduction de la biomasse de rhizomes était de 90 à 96 %. Malgré les nombreux avantages de la culture en couloir, la technologie n'est pas encore largement acceptée par les petits producteurs de l'Afrique de l'Ouest. Certains des facteurs importants qui ne favorisent pas l'adoption de cette technologie comprennent la main d'œuvre supplémentaire pour la mise en place, l'élagage des émondes et la gestion générale des haies, la réduction de la surface de terre disponible pour les cultures vivrières et la réduction des rendements suite à la compétition et aux effets allélopathiques des haies (Kang *et al.* 1981).

L'ombrage de *I. cylindrica* en utilisant les cultures vivrières peut venir à bout de certaines des insuffisances enregistrées pour les plantes de couverture de production d'engrais vert. *Cajanus cajan* a été reconnu pour être efficace dans la réduction des rhizomes de *I. cylindrica* en Asie et en Afrique (Koch *et al.* 1990; Macdicken *et al.* 1997). L'association culturale entre *Citrullus lanatus* et *Vigna unguiculata* a effectivement supprimé efficacement la mauvaise herbe pendant huit semaines en Afrique de l'Ouest (Chikoye *et al.* 2001). L'espacement du

maïs en lignes serrées (50 cm) a permis de diminuer la matière sèche de *I. cylindrica* d'environ 42 % par rapport à l'espacement recommandé de 76 cm (Chikoye, données non publiées). Dans les jeunes plantations de 2-3 ans, les paysans mettent normalement les cultures vivrières (maïs, riz, arachide et soja) afin de réduire les espaces vides dans la végétation; ce qui permet de supprimer *I. cylindrica* (Anon., 1996). L'association culturale peut ne pas être possible dans les anciennes planteations à cause de la forte compétition. L'association des cultures et un espacement étroit sont recommandés après que les populations de *I. cylindrica* sont réduites à la suite du labour ou des traitements chimiques.

Gestion intégrée

Aucune des méthodes décrites ci-dessus à elle seule ne peut permettre de lutter durablement contre *I. cylindrica*. Le meilleur moyen de contrôler *I. cylindrica* est la mise en oeuvre d'une approche intégrée qui utilise diverses options qui doivent être ajustées aux conditions socio-économiques et agronomiques d'un paysan pris individuellement (type de sol, climat, coûts, pratiques locales et préférences). Par exemple, la croissance de la mauvaise herbe peut être supprimée par aplatissement, labour ou traitement chimique suivi de la plantation de plantes de couverture compétitives ou de cultures vivrières de couverture qui préviennent la ré-infestation. Pour utiliser avec succès les plantes de couverture le feu de brousse doit être strictement évité. Les améliorations de la teneur en azote du fait des légumineuses de couverture pourront renforcer la vigueur des plantes et leur permettre d'être plus compétitives vis à vis de *I. cylindrica*. Comme Terry (1994) l'a stipulé, la technologie pour résoudre le problème de *I. cylindrica* est disponible. Plus d'efforts devraient être orientés vers la promotion de ces techniques de lutte dans les endroits envahis par cette mauvaise herbe.

REMERCIEMENT

Le présent manuscrit est publié avec l'approbation de l'Institut International d'Agriculture Tropicale.

BIBLIOGRAPHIE

Aken'Ova., M.E. & Atta-Krah, A.N. 1986. Control of speargrass (*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.) in an alley-cropping fallow. *Nitrogen-Fixing Tree Research Reports* 4: 27-28.

Akobundu, I.O. & Ekeleme, F., 2000. Effects of method of *Imperata cylindrica* management on maize grain yield in the derived savanna of south-western Nigeria. *Weed Res.* 40: 335-341.

Akobundu, I.O., Udensi, U.E. & Chikoye, D. 2000. Velvetbean (*Mucuna* spp.) suppresses speargrass (*Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel) and increases maize yield. *Int. J. Pest management* 46: 103-108.

Anoka, U.A., Akobundu, I.O. & Okonkwo, S.N.C., 1991. Effects of *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud and *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit on growth and development of *Imperata cylindrica* (L.) *Raeuschel. Agroforestry Systems* 16: 1-12.

Anon. 1996. *Imperata Management for Smallholders: an extensionist's guide to rational Imperata management for smallholders.* Indonesian Rubber Research Institute,Indonesia, and Natural Resources Institute, United Kingdom. 56 pp.

Avav, T. 2000. Control of speargrass (*Imperata cylindrica* (L.) Raeuschel) with glyphosate and fluazifop-butyl for soybean (*Glycine max* (L.) Merr) production in the savanna zone of Nigeria. *J. of the Science of Food and Agriculture* 80: 193-196.

Brook, R.M. 1989. Review of literature on *Imperata cylindrica* (L.) Raueschel with particular reference to southeast Asia. *Tropical Pest Management* 35: 12-25.

Chikoye, D. & Ekeleme, F. 2001. Growth characteristics of ten *Mucuna* accessions and their effects on the dry matter of *Imperata cylindrica* (L.) Rauesch. *Biological Agriculture and Horticulture* 18: 191-201.

Chikoye, D., Ekeleme, F. & Udensi, E.U. 2001. *Imperata cylindrica* suppression by intercropping cover crops in *Zea mays/Manihot esculenta* sytems. *Weed Sci* 49: 658-667.

Chikoye, D., Manyong, V.M., Carsky, R., Ekeleme, F., Gbehounou, G. & Ahanchede, A. 2002. Response of speargrass (*Imperata cylindrica*) to cover crops integrated with hand-weeding and chemical control in maize and cassava. *Crop Protection* 21: 145-156.

Dalziel, J.M. & Hutchinson, J. 1937. *The useful plantes of West Tropical Africa.* The Crown Agents for the Colonies, London, UK. 612 pp.

Eussen, J.H.H. & Wirjahardja, S. 1973. Studies on an alang-alang (*Imperata cylindrica* (L.)Beauv.) vegetation. *BIOTROP Bulletin No. 6,* Indonesia. 24 pp.

Friday, K.S., Drilling, M.E., & Garrity, D. 1999. *Imperata Grassland Rehabilitation Using Agroforestry and Assisted Natural Regeneration.* International Center for Research in Agroforestry, Southeast Asian Regional Research Programme, Bogor, Indonesia.167 pp.

Garrity, D.P., Soekadi, M., Van Noordwijk, M., De la Cruz, R., Pathak, P.S., Gunasena, H.P.M., Van So, N., Huijun, G. & Majid, N.M., 1997. The *Imperata* grasslands of tropical Asia: area, distribution, and typology. *Agroforestry Systems* 36: 3-29.

Holm, L.G., Plucknett, D.L., Pancho, J.V., & Herberger, J.P. 1977. *The World's Worst Weeds: Distribution and Biology,* Honolulu, University Press of Hawaii, 609 pp.

Ivens, G.W. 1975. *Studies on Imperata cylindrica (L.) Beauv. and Eupatorum odoratum L* Weed Research Project R 2552, 1971-1973. Technical Report, Agricultural Research Council Weed Research Organization, Begbroke Hill, UK. 26 pp.

Ivens, G.W. 1980. Imperata cylindrica (L.) Beauv. in West African agriculture. BIOTROP Special Publication No. 5, Indonesia, pp. 149-156.

Kang, B.T., Wilson, G.F. & Sipkens, L. 1981. Alley cropping maize (*Zea mays* L.) and leucaena (*Leucaena leucocephala* Lam.) in Southern Nigeria. *Plante and Soil* 63: 165-179.

Koch, W., Großmann, F., Weber, A., Lutzeyer, H.J. & Akobundu, I.O. 1990. Weeds as components of maize/cassava cropping systems. pp. 283-298, In *Standortgemaesse landwirtschaft in West Afrika.* Universitaet Hohenheim, Stuttgart, Germany.

Komolafe, D.A. 1976. Weed problems in tree crops in Nigeria. *Pest Articles and News Summary* 22: 250-256.

Macdicken, K.G., Hairiah, K.L., Otsamo, A., Duguma, D., & Majid, N.M 1997. Shade-based control of *Imperata cylindrica*: tree fallows and cover crops. *Agroforestry Systems* 36: 131-149.

Paul, R. & Elmore, C.D. 1984. Weeds and the C4 syndrome. *Weeds Today* 15: 3-4.

Santiago, A. 1965. *Studies on the autecology of I.cylindrical (L.) Beauv.* pp. 499-502. *In Proc. of the 9th Int. Grasslands Congress,* Sao Paulo, Brazil.

Santoso, D., Adiningsih, S., Mutert, E., Fairhurst, T., Noordwijk, M., Van Noordwijk, M. & Garrity, D.P. 1997. Soil fertility management for reclamation of *Imperatai* grasslands by smallholder agroforestry. *Agroforestry Systems* 36: 181-202.

Shilling, G.G. & Gaffney. J.F. 1995. Cogongrass control requires integrated approach. *Restoration and Management Notes* 13: 227.

Soerjani, M. 1970. Alang-alang [*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.] (1812). Pattern of growth as related to its problem of control. *BIOTROP Bulletin No. 1,* Indonesia, 88pp.

Terry, P.J. 1994. *Imperata cylindrica* (L.) Raueschel. pp. 63-70. *In* Labrada, R., Caseley, J. C.& Parker, C., eds. *Weed management for developing countries.* FAO, Rome.

Terry, P.J., Adjers, G., Akobundu, I.O., Anoka, A.U., Drilling, M.E., Tjitrosemito, S. & Utomo, M. 1997. Herbicides and mechanical control of *Imperata cylindrica* as a first step in grassland rehabilitation. *Agroforestry Systems* 36: 151-179.

Townson, J.K. 1991. *Imperata cylindrica* and its control. *Weed Abstracts*, 40: 457-468.

Udensi, E.U., Akobundu, I.O., Ayeni, A.O. & Chikoye, D. 1999. Management of congograss (*Imperata cylindrica*) with velveltbean (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) and herbicides.*Weed Tech.* 13: 201-208.

Vissoh, P., Manyong, V.M., Carsky, J.R., Osei-Bonsu, P. & Galiba, M. 1998. Experience with *Mucuna* in West Africa. pp. 1-32. In Buckles, D., Etéka, A., Osiname, O., Galiba,M., Galiano, G., eds. *Cover Crops in West Africa Contributing to SustainableAgriculture.* International Development Research Centre, Canada.

Wibowo, A.M., Suharti, A.P.S., Sagala, H., Hibani, H. & Van Noordwijk, M. 1997. Fire management on Imperatta grasslands as part of agroforestry development inIndonesia. *Agroforestry Systems* 36: 203-217.

Le riz nuisible, caractères biologiques et contrôle

A. Ferrero

INTRODUCTION

Le terme riz (sauvage) nuisible englobe généralement toutes les espèces du genre *Oryza* qui se comportent comme le riz et qui se développent en rotation avec les mauvaises herbes du riz. Des populations des riz sauvages ont été signalées dans de nombreux endroits rizicoles dans le monde où la culture du riz est effectuée en semis direct (Parker et Dean, 1976; Ferrero et Finassi, 1995). Quand bien même le riz sauvage appartient à différentes espèces et sous-espèces, toutes ces plantes ont en commun l'aptitude à disséminer leurs graines avant la récolte du riz cultivé. Les plantes de riz sauvage peuvent également s'adapter à une large gamme de conditions environnementales. Les graines du riz sauvage ont souvent un péricarpe coloré en rouge et c'est pour cette raison que l'on utilise couramment le terme de riz rouge dans la littérature internationale pour identifier ces plantes sauvages. Ce terme cependant, n'est pas très approprié vu que les graines à enveloppe rouge sont aussi retrouvées chez des variétés cultivées et aussi absentes chez des formes variées de riz sauvages (FAO, 1999).

Dans la plupart des milieux rizicoles la propagation du riz sauvage est devenue très significative surtout à l'issue du passage de la transplantation au semis direct. Cette propagation a commencé à être plus sévère depuis les 15 dernières années, en particulier dans les pays européens, après la culture de variétés faibles et semi-naines de riz de type *indica* (Tarditi et Vercesi, 1993). La dissémination a généralement été favorisée par l'utilisation de semences commerciales de riz qui renferment des graines de riz sauvage.

L'infestation par le riz sauvage a été signalée dans 40 à 75 % des zones rizicoles des pays européens (communication personnelle), 40 % au Brésil (De Souza, 1989), 55 % au Sénégal (Diallo, 1999), 80 % au Cuba (Garcia de la Osa et Rivero, 1999) et 60 % au Costa Rica (Fletes, 1999).

ORIGINE ET DESCRIPTION

L'origine phylogénique des formes sauvages est étroitement liée à celle du riz cultivé. Plusieurs plantes de riz sauvage possèdent les mêmes caractéristiques que les deux espèces cultivées *Oryza sativa* et *O. glaberrima* (Khush, 1997). *O. sativa,* qui est connu comme riz asiatique est composé des groupes variétaux *indica, japonica* et *javanica*, et est cultivé partout dans le monde (Olofsdotter, 1999). *O. glaberrima* est également appelé riz africain et est principalement cultivé en Afrique de l'Ouest. Le genre *Oryza* rassemble plus de 20 espèces sauvages dont la majorité est diploïde. A partir des caractères morphologiques, physiologiques, biochimiques et des liens de croisement, huit différents génomes ont été identifiés à l'intérieur du genre *Oryza* (Aggarval *et al.* 1997).

Les espèces sauvages comme *O. perennis, O. nivara, O. rufipogon* et *O. longistaminata* possèdent le même génome et peuvent facilement être croisées avec l'espèce cultivée *O. sativa* (Olofsdotter, 1999). L'espèce sauvage *O. barthii* (*O. breviligulata*) est considérée comme étant le progéniteur après mutation du riz africain.

O. glumaepatula, une espèce sauvage endémique de l'Amérique Centrale et du Sud qui est conventionnellement considérée comme un sous-type de *O. rufipogon*, mais, selon des analyses génétiques récentes, il a été déterminée qu'elle est plus proche des formes africaines.

En plus de ces espèces, *O. latifolia, O. punctata, O. officinalis* (pérenne) et *Zizianiopsis miliacea* (pérenne) constituent quelques fois aussi des mauvaises herbes difficiles, aussi bien dans le riz cultivé, que des berges de réservoirs ou dans les cours d'eau où elles bloquent l'écoulement de l'eau. *O. latifolia* est une espèce de riz sauvage qui est répandue en Amérique Centrale où elle est normalement appelée 'Arrozon' ou 'Arroz pato' (Castro Espitia, 1999). Elle a une hauteur d'environ 2 m et produit des graines avec un péricarpe blanc.

Dans des milieux où la différentiation du riz s'est produite, plusieurs espèces d'*Oryza* sont fréquemment présentes ensemble dans la flore spontanée; tandis que dans les endroits où la culture a été importée, seuls les plantes de *O. sativa* constituent un problème de mauvaises herbes.

Les plantes nuisibles présentent une large variabilité de facteurs anatomiques, biologiques et physiologiques (Craigmiles, 1978; Kwon *et al.* 1992; Tang *et al.* 1997, Vaughan *et al.* 2001). Une étude faite sur 26 accessions de plantes nuisibles d'Uruguay a identifié deux principaux groupes d'échantillons. Un groupe contenant les plantes avec péricarpe noir, apex pourpre et de longue barbe montrant avec évidence des traits sauvages, alors que le second groupe a un péricarpe et un apex en paille pas de barbe, mimant les variétés cultivées (Federici *et al.* 2001).

Au stade de plantule, il est difficile de distinguer les plantes de riz sauvage des cultures (Hoaghland et Paul, 1978), alors que l'identification de la mauvaise herbe est possible après le tallage, grâce aux nombreuses différences morphologiques grossières avec les variétés de riz: talles plus nombreuses, plus longues et plus minces, les feuilles qui sont souvent hispides sur les deux faces, plantes hautes, pigmentation de plusieurs parties des plantes, dispersion facile des graines après leur formation dans la panicule (Diarra *et al.* 1985a; Coppo et Sarasso, 1990; Kwon *et al.* 1992, Suh *et al.* 1997).

Les graines de plusieurs biotypes nuisibles de *O. sativa* et *O. glaberrima* ont un péricarpe pigmenté du fait de la présence de quantités variables de tannins d'antocyanes, de cathékines et de cathecol (Baldi, 1971).

La pigmentation rouge est un caractère dominant contrôlé par plus d'un gène (Leitao *et al.* 1972; Wirjahardja *et al.* 1983)

La couche rouge des graines du riz sauvage récoltées avec la culture doivent être enlevée au moyen d'une mouture additionnelle, mais cette opération entraîne la brisure des graines et la réduction de la qualité (Smith, 1981; Diarra *et al.* 1985a, 1985b).

Les biotypes nuisibles de *O. sativa* ont été différentiés en types *indica* ou *japonica*, à partir des caractéristiques morphologiques et physiologiques, des isozymes, et des marqueurs RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*), marqueurs RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*) et marqueurs AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*).

Selon une étude financée par la Communauté Européenne, les mauvaises herbes de riz sauvage collectées dans les rizières de la méditerranée appartenaient au groupe *japonica* et celles en provenance du Brésil sont proches du groupe *indica* (Ghesquière, 1999). Dans cette étude aucun allèle spécifique de ces mauvaises herbes n'a été trouvé et qui puisse servir de marqueur diagnostic permettant de déterminer aisément l'origine variétale des formes nuisibles. Néanmoins, beaucoup de faits évidents semblent montrer que l'origine primaire du riz rouge sauvage pourrait provenir de croisements lointains entre les variétés *indica* et *japonica*.

Vaughan *et al.* (2001) ont démontré que les nombreux échantillons de biotypes sauvages collectés aux USA appartiennent non seulement aux sous espèces *indica* et *japonica*, mais aussi aux espèces *O. rufipogon* et *O. nivara*.

BIOLOGIE

Dormance et longévité de la graine

Contrairement aux variétés cultivées, les graines du riz nuisible montrent des degrés variables de dormance. La durée de la dormance varie suivant le biotype et les conditions de stockage après la libération des graines. La longueur de la dormance a été étudiée dans plusieurs pays en conditions naturelles. *O. punctata* était dormant pendant plus d'un an au Swaziland (Armstrong, 1968) et jusqu'à cinq ans en Afrique de l'Est (Majisu, 1970). Les graines viables du riz sauvage avec un péricarpe rouge sont demeurées dormantes pendant plus de deux ans aux USA (Klosterboer, 1978) et trois ans au Brésil (Leitao *et al.* 1972).

Les conditions environnementales au cours de la formation des graines, l'humidité et la température de stockage sont considérés comme étant les principaux facteurs qui peuvent affecter la durée de la dormance (Delatorre, 1999; Leopold *et al.* 1988; Ferrero, 1984). D'après Leopold *et al.* (1988), les graines du biotype au péricarpe en couleur de paille laissées à -15°C, ont montré une durée variable de dormance en relation avec l'humidité des graines après maturité. La levée de la dormance était plus rapide pour les graines ayant un taux d'humidité compris entre 6 et 14 % et très lente à une teneur en eau en dessous de 5 % ou supérieure à 18 %.

Souvent une réduction significative de la dormance se produit déjà à deux mois après la maturité (Cohn et Hughes, 1981). Bien que de nombreuses études aient été conduites au niveau biochimique, pour la définition des bases physiologiques et génétiques de la dormance (Footitt et Cohn, 1995; Cohn, 1996; Delatorre, 1999; Cai et Morishima, 2000), les mécanismes de l'initiation et de la levée de ce phénomène ne sont pas encore complètement clarifiées. La régulation de la dormance peut vraisemblablement être attribuée à des facteurs présents dans la glumelle et dans l'embryon (Delatorre, 1999).

Les graines décortiquées et stockées à -15°C ont maintenu leur dormance et étaient capables de germer lorsqu'elles étaient placées à 5°C (Cohn et Hughes, 1981). La levée de la dormance de graines du riz nuisible obtenue à l'aide de substances tels que le nitrite de sodium, l'acide propionique, le méthyl-propionate, la cytokinine, le n-propanol, était toujours suivie d'une baisse du pH des tissus de l'embryon (Footitt et Cohn, 1992).

La longévité des graines a fait l'objet d'une investigation dans plusieurs études qui ont donné des résultats contradictoires. Dans une recherche conduite aux USA, les graines issues de différentes populations de plantes de riz nuisible sont demeurées viables à près de 90 % après deux ans enfouissement dans le sol et à 20 % après sept années (Goss et Brown, 1939).

Selon Diarra *et al.* (1985a) la longévité des graines du riz nuisible peut se maintenir jusqu'à plus de douze ans.

Dans une étude conduite en Italie, la viabilité des graines de riz nuisible prises à une profondeur par labour d'un sol limoneux a diminué jusqu'à 6 % après un an et jusqu'à 5 % après être enfouies pendant deux ans (Ferrero et Vidotto, 1998a). Les graines non viables étaient vides, sans embryon et matière de réserve. Il a été présumé que plusieurs des graines peuvent germer sous des conditions environnementales favorables (température et teneur en oxygène suite aux opérations de labour), mais ne peuvent pas émerger du sol. Le taux de

germination des graines viables a varié dans le temps, décroissant de 91 % au début de l'expérimentation à 73 % après un ou deux ans d'enfouissement. Ce comportement était expliqué par le fait que beaucoup de graines qui étaient dormantes au début de l'expérimentation n'avaient pas germé et demeuraient encore dormantes pendant plus de deux ans. Les graines déterrées après un an ont eu besoin en moyenne de moins de temps pour germer que celles enfouies pendant deux ans.

Emergence

L'émergence du riz nuisible est fortement influencée par la texture du sol, la présence de l'eau sur le champ et la profondeur d'enfouissement de la graine, ce qui est strictement lié au labour qui a été adopté pour la préparation du sol (Ferrero et Finassi, 1995; Ferrero et Vidotto, 1997a; Saldain *et al.* 1996; Gealy *et al.* 2000).

Katayama (1969), a classé 20 espèces d'*Oryza* en cinq groupes selon leur comportement durant la germination, comme suit :

1. Groupe composé de *O. stapfii* et *O. subulata*, avec une germination survenant en deux ou trois jours.
2. Groupe composé de *O. barthii, O. minuta, O. latifolia, O. punctata*, avec une germination maximale à six jour et un taux de germination total dépassant 50 %.
3. Groupe composé de deux espèces ayant un comportement similaire à celui du groupe 2, mais le taux de germination est inférieur à 33 %
4. Groupe composé de *O. perennis, O. officinalis* et quatre autres espèces, avec une germination survenant jusqu'à neuf jours et plus de 60 %.
5. Groupe qui inclut *O. breviligulata*, avec une germination similaire à celle du groupe 4, mais avec un taux de moins de 50 %

Les plantules qui émergent avant le semis du riz contribuent principalement à l'émergence totale de la réserve de graines. Presque toutes les plantes poussant librement sur un sol non perturbé sont capables d'émerger de mi-avril à mi-mai, après avoir atteint une accumulation de 200 degrés jours de croissance (Ferrero *et al.* 1996) (Figure. 1). La température minimale pour la germination du riz nuisible est de l'ordre de 10°C, la même que celle des variétés cultivées.

Si le hersage et le labour sont pris en considération, l'émergence des plantules du riz sauvage par rapport à la banque de semences dans la couche de 0-10 cm est remarquablement influencée par le type de labour. En moyenne, les pourcentages d'émergence dans les parcelles hersées et labourées est de 7,2 % et 2.5 % respectivement (Ferrero et Vidotto, 1999) (Figure 2). Ces différentes valeurs d'émergence sont vraisemblablement dues aux mouvements des graines du riz sauvage dans le sol et ceci est déterminé par le labour. Le renversement la couche supérieure de sol enfouit les nouvelles graines et stimule leur dormance. Au même moment le labour ramène près de la surface les graines enfouies la saison précédente, mais plusieurs de ces graines perdent leur pouvoir germinatif.

L'âge des graines, la profondeur de l'enfouissement, les conditions d'inondation et un sol lourd ont tous une influence négative sur la germination des mauvaises herbes et sur leur émergence (Eastin, 1978; Ferrero et Finassi, 1995).

Dans les sols argileux, la germination des graines du riz nuisible localisées dans les 5 premiers centimètres de sol et couvertes par 6-8 cm d'eau était, en moyenne moins du tiers de celle enregistrée dans le même sol mais qui était juste maintenu humide (Vidotto et Ferrero, 2000).

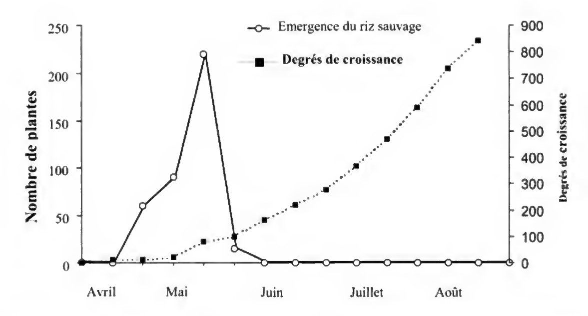


Figure 1. Emergence du riz nuisible sur un sol non remué en fonction des niveaux de croissance (de Ferrero *et al.* 1996)

Contrairement aux variétés cultivées, les riz nuisibles ne sont pas capables d'émerger au champ juste après la libération des graines en automne, bien que les températures soient favorables pour la germination. Selon les études menées dans des conditions méditerranéennes (Vidotto et Ferrero, 2000), le temps de germination dépend des conditions de stockage, et est inversement lié à la durée de stockage. Les graines nouvellement libérées mettent au moins 70 jours dans les conditions favorables de température et d'humidité avant que la germination ne commence. Dans les mêmes études, les graines du riz nuisible placées à 0-1 cm dans le sol ont présenté un taux de germination de 80-90 % dans les sols argileux et limoneux respectivement, lorsque le sol était continuellement gardé humide, puis entre 60 et 80 % lorsqu'elles sont submergées de 2-3 cm d'eau. Une réduction d'émergence a été observée avec une augmentation de la profondeur à la fois pour les sols humides et ceux inondés. L'émergence des graines placées à 4-5 cm dans le sol était de 20-40 % (respectivement dans les sols limoneux et lourds) dans les sols humides et entre 5-20% dans les sols inondés. Dans les deux types de sols, aucune émergence n'a été observée avec les graines enfouies à plus de 10 cm dans le sol. Les graines qui ne sont pas capables d'émerger sont en position de germer, mais pas pour donner des plantules viables. L'émergence à partir de 0-1 cm dans le sol était terminée en 14 jours dans le sol humide et en 18 jours dans le sol inondé (Ferrero et Finassi, 1995). Les graines enfouies à 4-5 cm dans le sol ont montré un retard dans la germination de 15 jours en comparaison avec les graines qui étaient placées près de la surface du sol. Ce comportement pourrait être l'une des raisons de l'émergence échelonnée de ces graines de riz sauvage.

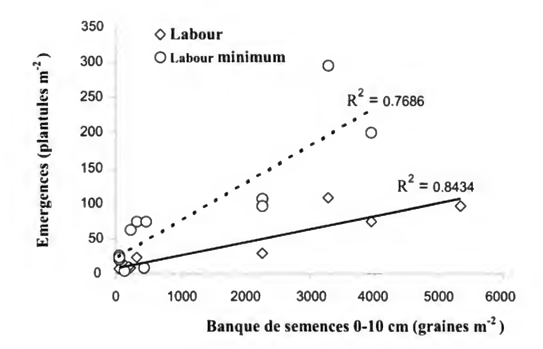


Figure 2. L'émergence du riz nuisible (rouge) à partir d'une banque de semences en fonction du labour du sol pour la préparation du lit de semences (de Ferrero et Vidotto, 1999).

Floraison

Chez les variétés sauvages et cultivées, la floraison commence par les fleurons du sommet de la panicule et évolue vers les fleurons inférieurs (Roy, 1921). Chez le riz sauvage, l'ouverture des fleurons débute entre 8 heures et 9 heures du matin et se poursuit jusqu'à au moins une heure de plus que chez les variétés cultivées. Pour cette raison, quand bien même toutes les espèces de riz sont des plantes autogames, la pollinisation croisée est plus élevée dans les cas des variétés sauvages que celles cultivées. La probabilité d'inter croisement entre les plantes sauvages à péricarpe rouge avec les variétés cultivées a été étudiée par Langevin *et al.* (1990). Le pourcentage de croisement varie entre 1,08 % chez la variété Lemont et 52,18 chez la variété Nortai. Le haut degré d'hybridation avec Nortai a été attribué à la prolongation de la durée de l'ouverture du fleuron chez cette variété. Grâce à l'effet hétérosis, les hybrides étaient généralement plus hauts et plus vigoureux et ont commencé à fleurir 20-30 jours plus tard par rapport aux parents sauvages nuisibles.

La floraison est induite par la longueur du jour (les photopériodes courtes augmentent la floraison), l'âge de la plante (plus élevée chez les plus jeunes plantes), le biotype (plus élevé chez les biotypes issus des latitudes lus élevées) (Katayama, 1974).

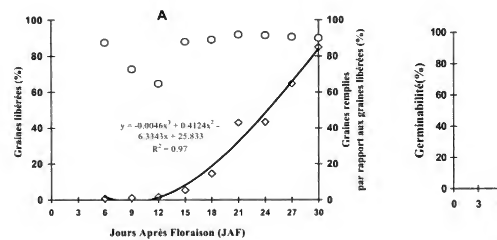
La pigmentation de l'enveloppe et de la graine commence à se développer dans l'épillet terminal peu de jours après l'anthèse et continue dans le reste de l'épillet au fur et à mesure qu'il mûrit (Holm *et al.* 1997).

Déhiscence

La déhiscence et la libération précoce des graines sont une caractéristique spécifique du riz nuisible. Ce comportement est contrôlé par le gène Sh qui montre le caractère de déhiscence et de libération des graines dans les conditions d'homozygotie dominante (Sh Sh) ou d'hétérozygotie (sh Sh) (Sastry et Seetharaman, 1973). La chute de la graine provient de la formation d'un tissu d'abscission constitué par trois couches de cellules entre l'épillet et le

pédicelle (Nagao et Takahashi, 1963). Cette couche de cellules n'est pas entièrement formée chez les variétés cultivées et des bandes de tissu lignifié assurent une l'adhésion de l'épillet au pédicelle. Ferrero et Vidotto, (1998a) ont découvert que la déhiscence chez le riz nuisible commence 9 jours après la floraison et s'accroît progressivement pendant 30 jours jusqu'au développement complet de la panicule (Figure 3). A cette étape, la libération des graines concerne 65 % du total des graines et n'est pas remarquablement influencée par les apports en azote.

Les graines libérées et celles qui ne le sont pas, prises dans leur ensemble ont commencé à être viables au bout de neuf jours à partir du début de la floraison, avec une capacité de germination d'environ 20 %. Cette valeur augmente rapidement pour atteindre déjà près de 85 % à 12 jours après la floraison. En général les graines libérées par déhiscence ont montré une faible capacité de germination jusqu'à 24 jours après la floraison en comparaison avec les graines non libérées. A partir de ce moment, la capacité germinative des deux groupes de graines était différente. La germination des graines libérées par déhiscence était très basse durant les 15 premiers jours après la floraison, avec un maximum d'environ 5 %. Ce comportement peut, plus vraisemblablement être expliqué par le développement incomplet des graines précocement libérées, qui se sont détachées surtout à cause des effets environnementaux (le vent). Les semences qui se détachent au delà de 15 jours après la floraison contenaient des graines presque remplies et physiologiquement matures.



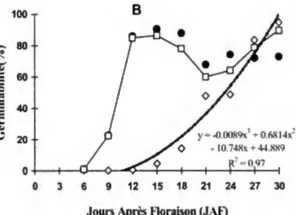


Figure 3. A. pourcentage de semences libérées par déhiscence sur le total (◇ données observées;
— Fonction ajustée) et pourcentage de graines remplies sur total graines libérées
(O données observées).
B. Evolution de la germination des graines libérées par déhiscence (◇) et celles qui ne sont pas libérées par déhiscence
(●) et germination moyenne des graines remplies (□). (extrait de Ferrero et Vidotto, 1998a)

Capacité compétitive

Le riz nuisible peut causer de lourdes pertes de rendement au riz cultivé en relation avec la densité, le type de plantes nuisibles et les variétés cultivées (Diarra *et al.* 1985a; Diarra *et al.* 1985b; Fisher et Ramirez, 1993; Eleftherohorinos *et al.* 2002). Les variétés naines sont souvent plus sensibles à la compétition du riz nuisible que les variétés de grande taille (Kwon

et al. 1991a). Plusieurs études ont été menées pour rechercher les effets des différentes densités du riz sauvage. Avec 11 plantes de riz sauvage m^{-2}, Abud, (1989) a observé une perte de rendement de l'ordre de 43 %. Dans les études conduites dans l'Arkansas, le rendement du cultivar semi-nain Lemont a été affecté déjà à une densité de plantes nuisibles aussi faible que 2 plantes m^{-2} (Kwon *et al.* 1991b). Cinq et 20 plantes m^{-2} de riz nuisible ont respectivement causé une perte de rendement de 40 et 60 %, chez le cultivar Oryzica 1 (Fischer et Ramirez, 1993). Des études ont démontré que les effets de la compétition sont fermement liés à la durée de l'interférence (Kwon *et al.* 1991a). Combinant les effets de la densité du riz nuisible et la durée de la compétition, Fischer et Ramirez (1993) ont observé une réduction de rendement de 50 % lorsque 24 plantes m^{-2} du riz nuisible sont en compétition avec la culture durant les 40 premiers jours après émergence. Avec la même densité initiale, la perte de rendement a atteint 75 % dans le cas d'une compétition qui a duré toute la saison. Dans un essai en serre, des effets significatifs sur la croissance des plantes de riz ont été enregistrés seulement lorsque la compétition a dépassé 70 jours à partir de l'émergence (Estorninos *et al.* 2000). Dans les études de compétition portant sur le cultivar Mars, la compétition intervariétale s'est montrée plus importante que la compétition intravariétale avec le riz nuisible se comportant comme compétiteur dominant (Pantone et Baker, 1991a; Pantone et Baker, 1991b). En considérant les composantes du rendement, l'effet de la densité des plantes semble significatif sur le nombre de panicules de riz par plante et de fleurons par panicule, tandis que le pourcentage de fleurons remplis et le poids des graines ne semble pas être influencés par ce paramètre (Pantone *et al.* 1992). Eleftherohorinos *et al.* (2002) ont fait remarquer que l'interférence entre le riz et le riz nuisible a commencé trois semaines après l'émergence du riz, mais n'a pas été affectée par une augmentation du niveau de l'azote de 100 à 150 kg ha^{-1}. Selon cette étude, une densité de 40 plantes de riz nuisible m^{-2} a entraîné une réduction de 46 et 58 % respectivement chez les variétés de riz Ariete et Thaibonnet

LA LUTTE

Les méthodes de lutte contre le riz nuisible qui peuvent être appliquées en culture de riz sont coûteuses, prennent du temps et le plus souvent ne permettent pas d'atteindre une éradication totale de cette mauvaise herbe. Une lutte incomplète contre l'herbe nuisible pour une année donnée pourrait entraîner l'annulation des résultats de plusieurs années d'un bon contrôle. Cinq pour cent d'échappées du riz nuisible peuvent produire suffisamment de graines pour restaurer les niveaux initiaux des banques de semences dans le sol (Goss et Brown, 1939; Rao et Harger, 1981).

La lutte contre les plantes du riz nuisible est beaucoup plus difficile que celle engagée contre les autres mauvaises herbes à cause de la grande variabilité morphologique, la particularité de la croissance et la haute affinité avec les variétés cultivées. Les méthodes chimiques de lutte avec les herbicides sélectifs pour le riz ne sont souvent pas efficaces contre les formes sauvages, à la seule exception des variétés transgéniques qui ont subit une transformation appropriée pour tolérer les herbicides qui sont sélectifs du riz cultivé et avec un large spectre d'activité. Pour cette raison, la lutte chimique ne peut pas être appliquée au riz cultivé durant sa phase végétative sauf si les herbicides sont appliqués avec des systèmes de pulvérisation en combinaison avec l'utilisation des variétés courtes. La lutte est également compliquée par l'étalement de la germination sur une longue période de la croissance du riz. La grande élasticité dans le processus de germination du riz nuisible peut favoriser la compétition de ses plantes qui sont capables de germer plus tôt que les plantes du riz cultivé, ou bien permettre à l'herbe d'échapper aux traitements réalisés en pré-levée sur le riz (Ferrero et Vidotto, 1997)

La lutte contre le riz nuisible peut être effectuée en appliquant des méthodes préventives, culturales, mécaniques et génétiques (Tableau 1).

Prévention

La prévention est le moyen clé pour la réduction de l'infestation des mauvaises herbes et peut être obtenue surtout en utilisant des semences saines non infestées par les graines du riz nuisible. Cette mesure n'est cependant pas facile à appliquer étant donné que les graines sont similaires à celles des variétés de riz cultivé, excepté la couleur du péricarpe. Les graines blanches et rouges sont difficiles à distinguer vu que la couleur du péricarpe ne peut être détectée qu'après décorticage. La seule possibilité pour obtenir des semences de riz libre des graines du riz nuisible est d'inspecter les champs et éliminer les plantes du riz nuisible avant la récolte (même manuellement).

Un autre système préventif important est celui du nettoyage rigoureux des instruments utilisés pour la récolte du riz afin d'éviter la dissémination des graines de la mauvaise herbe dans des champs non infestés.

Tableau 1. Principales méthodes et stratégies de lutte contre le riz nuisible

Stratégie de lutte	Méthode de lutte
Préventive	Semence certifiée
	Nettoyage du matériel
Culturale	Rotation
	Labour du sol
	Préparation du sol pour un faux lit de semences
	Gestion de l'eau
	Variété de riz
	Désherbage manuel
Mécanique	Avant semis du riz
	Après semis du riz
Chimique	Avant semis du riz
	Après semis du riz
Génétique	Variétés de riz tolérantes aux herbicides totaux

Méthodes culturales

Le meilleur contrôle du riz nuisible peut être obtenu par la rotation, mais cette pratique ne peut pas être appliquée dans des conditions particulières d'environnement, comme dans les sols salins ou hydromorphes (Català, 1995, Sagarra, 1987). Les cultures qui entrent normalement en rotation avec le riz dans les climats tempérés sont le soja, le maïs, le blé, le tournesol, le sorgho, , et d'autres cultures. L'introduction de la culture de *Vigna mungo* au Vietnam a conduit à une chute énorme du riz nuisible et d'autres espèces (Watanabe *et al.* 1998). Dans ces conditions, plusieurs mauvaises herbes peuvent émerger mais ne peuvent pas boucler leur cycle à cause de l'insuffisance de l'insuffisance de l'humidité du sol pendant la saison du *Vigna mungo*.

Plusieurs études menées en Italie ont montré que le contrôle du riz nuisible dans le soja est plus facile que dans le maïs (Ferrero et Vidotto, 1997b). Ce résultat peut être attribué au faible taux d'émergence des semences de la mauvaise herbe dans le maïs et la plus forte efficacité des herbicides dans le soja. La faible émergence dans le maïs est vraisemblablement le résultat de l'enfouissement des semences dans les couches profondes du sol au cours du labour, ce qui empêche leur germination. Dans ces conditions, les semences enfouies à plus de 10 cm ne sont plus capables d'émerger du sol. Une année de production de soja conduit à une réduction d'environ 97% des banques de semences dans les couches de 0-10 cm du sol

(Ferrero et Vidotto, 1997b). La réduction dans la même couche demeure toujours plus forte (98.5%) quand le soja est plantée à la fin du mois de mai après la vague d'émergence des mauvaises herbes du printemps.

L'application en post levée au soja et au maïs d'herbicides sélectifs a été moins efficace que la combinaison de traitement de pré- levée suivi du traitement de post émergence pour les deux cultures de rotation. Les meilleurs résultats (99% de contrôle) sur le soja ont été obtenus avec l'application en pré-levée de pendimethaline suivi par un traitement post-levée avec le propaquizafop.

Des résultats similaires avec la rotation ont été rapportés dans la partie Sud des Etats Unis, où une rotation d'un ou de deux ans avec le soja est fréquemment adoptée pour contrôler les infestations sévères des riz nuisibles (Barrentine *et al.* 1984 ; Khodayari *et al.* 1987 ; Minton *et al.* 1989 ; Griffin et Harger, 1990 ; Noldin *et al.* 1998). L'utilisation d'herbicides anti-germinatifs comme le metolachlor, à 3.5 kg ma ha^{-1}, l'alachlor à 3.5 kg ma ha^{-1}appliqués en pré -émergence du soja conduisent à un contrôle du riz nuisible d'environ 90%. Les graminicides comme le clethodim, le fluazifop-P, le quizalofop-P et le sethoxydim appliqués dans le soja en post émergence ont aussi prouvé leur efficacité dans la suppression des panicules des plants de riz nuisibles. Les meilleurs résultats sont souvent obtenus quand l'application de l'herbicide est retardée jusqu'au stade quatre feuilles (Askew *et al.* 2000).

Comme il a été vu précédemment, l'émergence du riz nuisible dépend fortement du type de labour du sol qui a été adopté pour la préparation du lit de semences et de la teneur en eau du sol pendant la germination des mauvaises herbes (Ferrero *et al.* 1996; Ferrero et Vidotto, 1999). Le labour minimum exécuté à une profondeur d'au plus 10 cm et une bonne condition d'humidité du sol créent les meilleures conditions pour l'émergence du riz nuisible, alors que le labour et l'inondation du sol affectent remarquablement la germination des mauvaises herbes. La préparation du lit de semence avec retournement de la terre peut être considérée comme une méthode qui aide à au contrôle agronomique quand l'infestation est faible et qu'aucune mesure de contrôle chimique n'est envisagée.

Une stratégie culturale de contrôle du riz nuisible inclut aussi l'utilisation de variétés de riz compétitive qui suppriment les mauvaises herbes et des variétés tolérantes à la submersion. Les variétés de haute taille et à cycle long montrent souvent une plus forte compétitivité que les variétés modernes précoces et semi-naines. La plantation des variétés de hautes tailles comme le Kilombero en Tanzanie a conduit à la suppression de *O. barthii,* alors que la culture des variétés de taille courte 'Katrin' a conduit à une forte croissance de la mauvaise herbe (Jonhson, *et al.* 1999).

La compétitivité du riz cultivé peut être aussi améliorée en augmentant la densité de semis, mais, cette pratique provoque fréquemment une aggravation du vers et une plus forte incidence des organismes nuisibles (Sonnier, 1978).

La préparation d'un lit de germination encore appelée fausse technique de semis, est une méthode culturale communément utilisée dans la monoculture de riz. Après la préparation du lit de semence, la surface est laissée inoccupée pour permettre au riz nuisible et aux autres mauvaises herbes de s'installer. Le riz peut être ensuite soit semé en lignes ou dans l'eau après que les mauvaises herbes sont détruites par des moyens mécaniques (herses) ou chimiques (herbicides non sélectifs). Cette technique conduit à une réduction de l'infestation de la mauvaise herbe dans la même saison où elle est appliquée et fait décroître graduellement sa banque de semences. La réussite des faux lits de semences dépend de la manière dont le sol est préparé, de la gestion de l'eau et de sa durée. Comme il a été montré précédemment, le labour minimum conduit à un fort pourcentage de germination des semences présentes dans les couches superficielles du sol, comparativement au labour avec retournement du sol. A Rio

Grande do Sul (Brésil), environ 250 000 ha sont cultivés chaque campagne agricole en utilisant le labour minimum (Nolding et Cobucci, 1999). L'inondation du sol pendant l'application de la technique du faux lit de semence réduit l'émergence du sol comparé au sol sec ou humide, mais favorise la régularité de la germination qui en retour rend le contrôle plus facile. La durée du faux lit de semences doit être un compromis entre la nécessité d'obtenir le plus grand nombre de plantules au stade 2-3 feuilles et la nécessité de ne pas retarder trop longtemps le semis du riz. La durée de cette technique dans les conditions de climats tempérés est d'environ 25-30 jours.

La gestion de l'eau peut jouer un rôle important dans le contrôle du riz nuisible. Comme il a été rapporté précédemment, l'inondation sur des sols bien nivelés limite la germination du riz nuisible (Diarra *et al.* 1995c; Vidotto et Ferrero, 2000). Le malaxage du sol combiné avec la présence d'une fine couche d'eau sur les sols bien nivelés maintient les conditions anaérobiques dans les couches superficielles et empêche l'établissement des plantes de mauvaises herbes (Fisher, 1999). La plantation de semences de riz pré-germées sur des sols préalablement inondés pendant 20 jours après le malaxage a conduit à un bon étouffement de ces mauvaises herbes en Amérique Centrale (Armenta et Coulombe, 1993). La combinaison du semis dans l'eau et l'utilisation de semences indemnes de graines de riz sauvage ont conduit à la disparition virtuelle de la mauvaise herbe en Californie (Fisher, 1999).

Le contrôle du riz nuisible est quelquefois fait manuellement mais cette pratique est coûteuse et prend du temps. Le sarclage manuel n'est pas pratique jusqu'à 30-40 jours après l'émergence de la culture car il est très difficile de distinguer dans les premiers stades les variétés de riz cultivées du riz sauvage. Cette pratique est alors faite quand plusieurs dommages liés à la compétition ont déjà eu lieu.

Le sarclage manuel des plantes de riz sauvage est quelquefois accompli pour les infestations légères et fréquemment il est utilisé conjointement avec un autre moyen de contrôle (par exemple chimique) quand ce dernier a donné de mauvais résultats, afin d'éviter la dispersion des graines. La méthode de contrôle manuel est aussi d'une grande importance dans les champs où les récoltes sont destinée à la production de semences en vue d'obtenir une production débarrassée de toutes mauvaises herbes.

La mécanique

Plusieurs techniques utilisant des instruments mécaniques peuvent être appliquées au contrôle du riz sauvage. La plupart de ces techniques peuvent être appliquées à la pré-plantation des cultures, après l'émergence du riz sauvage qui peut être stimulée par le labour qui est fait pour préparer le lit de semence. La germination peut être aussi accélérée par arrosage du champ ou par les pluies de la saison. Les plantules de mauvaises herbes peuvent alors être détruites par des lames ou par des hersages rotatifs menés aussi bien sur les sols secs que sur les sol inondés, juste avant le semis du riz. Le contrôle des mauvaises herbes obtenu par cette pratique est satisfaisant, mais consomme plus de temps et est souvent plus faible par rapport à celui exécuté avec la destruction chimique (Ferrero *et al.* 1999). Le contrôle mécanique peut aussi favoriser de nouvelles vagues d'émergence de mauvaises herbes après les interventions à cause de la stimulation de la germination des semences amenées à la surface du sol par les machines (Fnassi *et al.* 1996).

Le riz sauvage peut être aussi mécaniquement contrôlé dans le riz planté en lignes. Dans le Delta de Mekong (Vietnam) cette méthode a permis de sauver plus de 100 kg de semences de riz et a également permis de réduire les dommages des insectes, les maladies et la verse (Chin *et al.* 1999). Avec cette technique de semis, il est possible pour les agriculteurs d'arracher les pousses de mauvaises herbes dans les interlignes en utilisant des outils mécaniques et d'élever

des poissons ou des crevettes qui peuvent mieux croître que dans les eaux où les semis sont faits à la volée. (Quan, 1999).

Le contrôle mécanique peut aussi être appliqué après le semis du riz quand le riz nuisible est plus haut que la culture. Cette pratique a pour objectif d'empêcher la dispersion de la mauvaise herbe et est surtout fait en coupant les panicules de la mauvaise herbe avant qu'elle ne produise des semences.

En Colombie, la panicule est coupée à la machette alors qu'en Europe, cette opération est exécutée avec la combinaison d'un moissonneur - coupeur, monté à l'avant d'un tracteur (Ferrero et Vidotto, 1999). Les équipements de coupe sont souvent équipés avec des rouleaux broyeurs faits de deux rouleaux contre-rotatifs. L'expérience européenne a montré qu'au moins 94% des panicules peuvent être coupées en utilisant cet équipement en deux phases, premièrement au début de la floraison et second phase 15 jours plus tard.

Le contrôle chimique

La forte similarité anatomique et physiologique à la culture rend le contrôle du riz nuisible avec les herbicides sélectif de post-levée très difficile. La gestion technique la plus réussie est basée sur l'application d'herbicide avant la plantation, avant et après l'émergence des mauvaises herbes.

Plusieurs herbicides antigerminatifs tels que les chloroacetamides, les thiocarbamates et les dinitroanilines appliqués seuls ou en mélange avec d'autres herbicides ont prouvé leur efficacité sur le riz nuisible avant son émergence (Khodayari *et al.* 1987; Griffin et Harger, 1990; Noldin *et al.* 1998). Un bon contrôle de ces mauvaises herbes (souvent au delà de 75 %) peut être obtenu dans les conditions de riz européen avec du pretilachlor et du dimethenamide utilisés seuls ou en combinaison respectivement à 1.5 kg m.a ha^{-1} et 0.48 kg ha^{-1} (Ferrero et Vidotto, 1999). Pour éviter tout risque de phytotoxicité, les deux herbicides doivent être appliqués au moins 25 jours avant le semis du riz.

Les principaux herbicides thiocarbamates qui sont utilisés pour le contrôle des plantes nuisibles sont le molinate et le butylate (Smith, 1981; Fisher, 1999; Garcia de la Osa et Rivero, 1999). Les deux produits sont appliqués en pré-plantation et doivent être immédiatement incorporés dans le sol pour éviter la volatilisation. Selon les expérimentations menées par le CIAT en Amérique Centrale et du Sud, les meilleurs résultats peuvent être obtenus en appliquant le molinate à 7.2 kg m.a ha^{-1} et le butylate à 4.2 kg m.a ha^{-1} avec des protecteurs de semences comme l'oxabetrinil à 1.5 g m.a kg^{-1} et le flurazole à 2.5 g m.a kg^{-1} (Smith, 1992).

Dans les monocultures continues inondées, une gestion efficace du riz nuisible est souvent réalisée par l'application du faux lit de semences suivi par la pulvérisation de graminicides ou d'herbicides totaux une fois que les mauvaises herbes ont atteint le stade de 2-3 feuilles au moins (Vidotto *et al.* 1998). Les graminicides les plus fréquemment utilisés sont le dalapon (environ 12 kg m.a ha^{-1}), le clethodim (0.2 kg m.a ha^{-1}) et le cycloxydim (0.6-0.8 kg m.a ha^{-1}). D'autres herbicides à large spectre sont le glyphosate (1-1.5 kg m.a ha^{-1}), le gluphosinate ammonium (0.5-0.7 kg m.a ha^{-1}), le paraquat (0.8 kg m.a ha^{-1}) et l'oxy-fluorfen (0.8 kg m.a ha^{-1}). Les graminicides sont hautement efficaces même aux premiers stades des mauvaises herbes alors que les herbicides totaux doivent être appliqués sur des plantes plus développées. Différer le traitement sur des stades de croissance plus avancés de l'adventice, suppose la plantation de variétés très précoces et quelques fois des variétés à faibles rendements.

Les contrôles chimiques des cultures après plantation doivent être seulement considérés comme une opération de 'sauvetage' et sont basés sur la différence en taille ou en stade de croissance entre le riz sauvage et le riz commercial. Cette pratique empêche l'infestation d'empirer, mais n'a pas d'influence sur la relation de compétition entre la mauvaise herbe et la -culture.

Le riz nuisible qui est plus haut que le riz cultivé peut être traité avec des herbicides foliaires systémiques comme le glyphosate ou le cycloxydim, respectivement à une concentration de 20 et 5 % en utilisant des applicateurs à mèche/racleur. Cet équipement passe les herbicides au dessus des mauvaises herbes et, à cause de la différence de taille entre ces plantes et la culture, empêche le contact avec la végétation désirée. Les applicateurs mèche/racleurs sont souvent faits d'un châssis et d'une corde, d'éponge ou de tapis qui peut absorber la solution d'herbicide et la passer sur la mauvaise herbe (Stroud et Kempen, 1989). Ils peuvent être montés sur des machines auto-mobiles, à l'avant d'un tracteur ou être un équipement manuel. Les résultats des traitements faits avec cet équipement sur les variétés semi-naines au début de la floraison des plantes sauvages ont montré une réduction de plus de 90 % de la germination des semences des mauvaises herbes (Balsari et Tabacchi, 1997; Ferrero et Vidotto, 1999). Ce pourcentage concerne seulement les semences des panicules des mauvaises herbes qui viennent en contact avec l'équipement de nettoyage. Environ le tiers des panicules dans le champ expérimental ont échappé au traitement puisqu'ils les plantes ont la même taille ou une taille inférieure à celle de la culture. Les semences des panicules qui ont échappé peuvent d'une part augmenter la banque de semences du sol, mais d'autre part, peuvent sélectionner des biotypes courts pour les années suivantes et qui donc ne peuvent plus être contrôlés par cet équipement.

La viabilité des semences de riz nuisible peut être affectée en pulvérisant l'hydracide maleic au stade épiaison de ces plantes (Noldin et Cobucci, 1999). Pour éviter les effets négatifs sur les rendements et la viabilité des semences, les plantes du riz commercial doivent être plus précoces et doivent avoir atteint le stade laiteux. L'utilisation de ce régulateur de croissance a été approuvée au Brésil et est entrain d'être testé dans plusieurs pays d'Amérique du Sud.

Génétique et Biotechnologies

L'approche génétique et biotechnologique est entrain d'être largement adoptée pour faire face aux problèmes biotiques et abiotiques du riz comme la rareté de l'eau, les températures basses et fortes, les déprédateurs, les maladies et le contrôle des mauvaises herbes (Fujimoto *et al.* 1993; Rathore *et al.* 1993; Christou, 1994).

Le problème de riz nuisible peut être attaqué par l'introduction de variétés tolérantes à des herbicides- qui permettent le contrôle sélectif en post-levée de cette plante (Linscombe *et al.* 1996; Wheeler *et al.* 1997).

Plusieurs travaux de génétique classique et en particulier des recherches biotechnologiques ont été menés pour obtenir des variétés résistantes au glyphosate, au gluphosinate-ammonium, aux imidazolinones et aux herbicides large spectre non sélectifs pour les variétés traditionnelles de riz. Plusieurs accessions de riz tolérantes au glyphosate et au sulphosate ont été identifiées, parmi plus de 14 000 originaires de la Colombie, du Brésil, de l'Inde et des Etats- Unis (Dilday *et al.* 1995).

Le contrôle des plantes du riz nuisible par l'utilisation de variétés tolérantes aux herbicides - peut conduire à différents résultats selon la variété, la période de traitement et les conditions culturales.

La variété résistante au gluphosinate- Gulfmont a montré des dommages quand elle fut exposée aux applications séquentielles de glyphosate à 0.42 kg m.a ha^{-1} (Wheeler *et al.* 1998). Le glufosinate peut être appliqué en toute sécurité aux variétés transgéniques au stade 3-4 feuilles ou au stade de tallage (Sankula *et al.* 1997a). Le gluphosinate appliqué au stade 3-4 feuilles du riz nuisible (riz rouge) a conduit à un meilleur contrôle (91 %) qu'à l'initiation des panicules (74 %) ou au stade d'élongation (77 %) (Sankula *et al.* 1997b). Un meilleur contrôle du riz rouge a été obtenu par application de gluphosinate aux champs de riz drainés (Sankula *et al.* 1997 a). L'inondation du sol réduit l'activité de l'herbicide proportionnellement à la profondeur de l'eau.

L'imazethapyr peut être sélectivement appliqué aux variétés résistantes à l'imidazolinone- (riz IMI). Cet herbicide a prouvé son efficacité contre le riz rouge/nuisible et d'autres mauvaises herbes du riz quand il est appliqué en traitement de sol ou en traitement foliaire à 70 kg m.a. ha^{-1} (Olofsdotter *et al.* 1999).

L'introduction de variétés résistantes aux herbicides suscite souvent des inquiétudes au point de vue éthique, sanitaire, social, environnemental et biologique. Les problèmes d'éthique et sanitaires concernent surtout la question de savoir si l'homme a le droit de manipuler le génome naturel de l'être humain avec les technologies de l'ingénierie génétique et le risque supposé pour la santé humaine du produit obtenu à partir des plantes transgéniques.

Le problème social pourrait être lié à la dépendance des riziculteurs vis à vis des producteurs de semences résistantes de riz. Ce problème est considéré au premier plan dans les pays en développement où les producteurs de riz sont habitués à garder des semences d'une saison à l'autre.

Les contraintes environnementales et biologiques sont surtout associées au risque de transfert du gène de résistance de la culture à d'autres espèces d'*Oryza*, la croissance de repousses de riz résistant ou la sélection, à la longue, de plantes incontrôlées (Langevin *et al.* 1990; Oard *et al.* 2000).

Le transfert du gène de résistance aux espèces sauvages est fort probable puisque l'incidence d'hybridation naturelle, a été rapporté comme étant situé entre 1-52 % respectivement dans les variétés à floraison précoce et les variétés à floraison tardive (Langevin *et al.* 1990). Les études en milieu réel menées en Espagne ont montré que la moyenne de flux de gènes de la variété transgénique Senia (tolérante au glyphosate) au riz nuisible/rouge, en considérant toutes les directions du vent, était de 0.082 % (Messeger, 2002). Ces découvertes suggèrent qu'après quelques générations les avantages du gène de résistance aux herbicides pourraient disparaître partiellement.

La culture continue de variétés de riz transgéniques ou IMI pourrait aussi conduire à la sélection de plantes incontrôlées. Cette contrainte peut être surmontée en se tournant vers la rotation culturale (par exemple le soja) et en utilisant des herbicides avec différents mécanismes d'action ou des contrôles de mauvaises herbes avec des moyens mécaniques.

Les repousses de riz pourraient devenir un réel problème surtout dans la production de semences certifiées non-transgéniques. Pour cette raison, la culture du riz ordinaire pour la production de semences ne doit pas succéder à la production d'une variété de riz transgénique.

CONCLUSIONS

Plusieurs espèces du genre *Oryza* se comportent comme de mauvaises herbes quand bien même ils partagent la plupart des caractéristiques des variétés de riz cultivées. Elles sont indésirables, par-dessus tout, parce que leurs semences peuvent être facilement libérées par

déhiscence avant le battage des cultures et rester en dormance dans le sol pendant une longue période. Les variétés de riz nuisibles/rouges sont souvent très similaires aux variétés commerciales aussi bien au regard de la morphologie de la plante que de la tolérance aux herbicides. A cause de leur forte aptitude à la compétition, ces mauvaises herbes peuvent remarquablement affecter les rendements de riz.

Le contrôle efficace du riz sauvage ne peut être basé sur une seule pratique, mais doit reposer sur un programme complexe de gestion basée sur une combinaison appropriée de moyens préventifs, culturaux, mécaniques, chimiques et génétiques (Vidotto *et al.* 2001). Les méthodes préventives qui incluent l'utilisation de semences indemnes de riz nuisible/rouge et d'équipements bien nettoyés sont le point de départ d'une application réussie des autres moyens de contrôle. Des pratiques culturales, la rotation est fréquemment le meilleur moyen de réduire les infestations sévères de riz nuisibles. En culture continue de riz, un contrôle efficace de la mauvaise herbe peut être obtenu en appliquant la méthode de faux lit de semences pour stimuler la germination et en détruisant les plantules par hersage ou avec des herbicides.

La dispersion des semences de riz nuisible peut être évitée avec succès dans les cultures après la plantation aussi bien par les coupes de panicules que par des applications localisées d'herbicides systémiques, mais ces mesures doivent être orientées plus vers l'objectif d'empêcher l'aggravation des infestations que vers l'objectif de les réduire.

L'introduction de variétés résistantes aux herbicides- offre aux producteurs de riz une bonne opportunité pour gérer le riz rouge et d'autres mauvaises herbes, bien que sa réussite dépende de comment les stratégies de cultures peuvent éviter le transfert de gènes résistants aux mauvaises herbes.

BIBLIOGRAPHIE

Aggarval, R.K., Brar, D.S. & Klush, G.S. 1997. Two new genomes in the *Oryza* complex identified on the basis of molecular divergence analysis, using total genomic DNA hybridization. *Molecular General Genetics* 254, 1-12.

Armenta, S.J. & Coulombe, J. 1993. *Highlights of the Caribbean Rice Improvement Network Activities (1986-1992)*, Bonao, Dominican Republic: CRIN/CIAT/IRRI/IICA/SEA: 53-65.

Armstrong, K. 1968. Weed control on a Swaziland rice and sugar cane estate. *Proc. 9th British Weed Control Conference-9*, 687-693.

Askew, S.D, Shaw, D.R. & Street, J.E. 2000. Graminicide application timing influences red rice (*Oryza sativa*) control and seedhead reduction in soybean (*Glycine max*). *Weed Tech.* 14: 176-181.

Baldi, G. 1971 Presenza del carattere *Pericarpo rosso* in varietà di riso coltivate (*O. sativa*). *Il riso* 20: 299-302.

Balsari, P. & Tabacchi, M. 1997. Lotta meccanica di soccorso al riso crodo. *L'informatore Agrari*, 53 (14), 56-60

Barrentine, W.L., Street, J.E. & Kurtz, M.E 1984. Post-emergence control of red rice (*O. sativa*). *Weed Sci.* 32: 832-834.

Cai, H.W. & Morishima, H. 2000. Genomic regions affecting seed shattering and seed dormancy in rice. *Theoretical and Applied Genetics* 100: 840-846.

Castro Espitia, H.A. 1999. *Manejo de arroces contaminates en las areas productoras de arroz comercial de Costa Rica.* Report of the Global Workshop on Red Rice Control, 30 August-3 September, Varadero, Cuba, 19-24.

Català, M. 1995. Chemical and cultural practices for red rice control in rice fields in Ebro Delta, Spain. *Crop Protection* 5: 405-408.

Chin, D.V., Hach, C.V., Thanh, N.C. & Tai, N.T. 1999. *Weedy rice situation in Vietnam.* Report of the Global Workshop on Red Rice Control, 30 August-3 September, Varadero, Cuba, 67-74.

Cohn, M.A. & Hughes, J.A.1981. *Seed dormancy in red rice* (*Oryza sativa* L.) I. Effect of temperature on dry after-ripening red rice. *Weed Sci.* 29, 402-404.

Cohn, M.A. 1996. Chemical mechanisms of breaking seed dormancy. *Seed Science Research* 6: 95-99.

Coppo, B. & Sarasso, G. 1990. Il riso crodo. In *Quaderno Agricolo, Istituto Federale di Credito Agrario, Piemonte, Liguria e Valle d'Aosta* 22: pp.15-29.

Craigmiles, J.P. 1978. Introduction. In *Red rice research and control,* ed. Eastin, E.F. pp.5-6. Texas Agric. Exp. Stn. Bull, pp.1270

Christou, P. 1994. *Biotechnology of food crops – Rice biotechnology and genetic engineering*. Technomic Publishing Company, Lancaster, USA, pp.201

Delatorre, C.A.1999. Dormencia em sementes de arroz vermelho. *Ciencia Rural* 29: 565-571.

De Souza, P.R. 1989. Arroz vermelho: um grande problema. *Lavoura arrozeira* 42 : 30-31.

Diallo, S. 1999. *Problème posé par le riz rouge en riziculture au Sénégal*. Report of the global workshop on red rice control, 30 August-3 September, Varadero, Cuba, 45-49.

Diarra, A.R.J., Smith, R.J. & Talbert, R.E. 1985a. Growth and morphological characteristics of red rice (*Oryza sativa*) biotypes. *Weed Sci.* 33: 310-314.

Diarra, A.R.J., Smith, R.J. & Talbert, R.E 1985b. Interference of red rice (*Oryza sativa*) with rice (*O. sativa*). *Weed Sci.* 33: 644-649.

Diarra, A.R.J., Smith, RJ. & Talbert, R.E. 1985c. Red rice (*Oryza sativa*) control in drill-seeded rice (*Oryza sativa*). *Weed Sci.* 33: 703-707.

Dilday, R.H., Jalaluddin, M. & Price, M. 1995. Tolerance in rice to glyphosate and sulfosate. *Proc.Int. Symposium on Weed and Crop Resistance to Herbicides.* Cordoba, Spain, 192-193.

Eastin, E. 1978. Additional red rice research in Texas. In *Red rice research and control.* Texas Agriculture Experimental Station Bulletin No. 1270.

Elefhterohorinos, I. G., Dhima, K.V. & Vasilakoglou, I.B. 2002. Interference of red rice in rice grown in Greece. *Weed Sci.* 50: 167-172.

Estorninos, L.E Jr., Gealy, D.R. & Talbert, R.E. 2000. *Interference between red rice and rice in a replacement series studies.* Research Series Arkansas Agricultural Experiment Station, pp. 463-468.

FAO. 1999. *Report of the Global workshop on red rice control.* Varadero, Cuba, 30 August-3 September, pp. 55.

Federici, M.T., Vaughan, D., Tomooka, N. Kaga, A. Wang, X.W., Doi, K., Francis, M., Zorrilla, G. & Saldain, N. 2001. *Analysis of Uruguayan weedy rice genetic diversity using AFLP molecular markers.* EJB Electronic Journal of Biotechnology. (available at http: /www.ejb.org/content/vol4/issue3/full/3)

Ferrero, A. & Finassi, A. 1995. *Viability and soil distribution of red rice (Oryza sativa L. var. sylvatica) seeds. In* Med. Fac. Landbouw., Rijksunv. Gent. pp. 205-211.

Ferrero. A., Finassi, A. & Vidotto, F. 1996. *Prediction of red rice seedling densities from seed bank. In* Med. Fac. Landbouw., Rijksuniv. Gent. pp. 1181-1187.

Ferrero, A. & Vidotto, F. 1997a. *Influence of soil labourage on red rice emergence. In* Med Fac. Landbouw. En Toegepaste Biologische Wetenschappen, Universiteit Gent, 62: 785-789.

Ferrero, A. & Vidotto, F. 1997b. Influence of the rotation on seed bank evolution of red rice (Oryza sativa L. var. sylvatica). *Proc.of the Int. Symposium on Rice Quality, Quality and Competitiveness of European Rices, Concerted Action-EC-DG VI (AIR3-PL93-2518).* Nottingham UK, November 24-27.

Ferrero, A. Vidotto, F. 1998a. Germinability after flowering, shattering ability and longevity of red rice seeds. *6th EWRS Mediterranean Symposium 1998, Montpellier,* 205-211.

Ferrero, A. & Vidotto, F. 1998b. Shattering ability of red rice seeds in cultural conditions. *Proc. 50th Int. Symposium on Crop Protection, Gent, Belgium*, 839-843.

Ferrero, A. & Vidotto, F. 1999. *Red rice control in rice pre- and post-planteing. In* FAO Report of the Global workshop on red rice control. Varadero, Cuba, 30 August-3 September, 95-107.

Ferrero, A., Vidotto, F., Balsari, P. & Airoldi, G. 1999. Mechanical and chemical control of red rice (*Oryza sativa* L. var. *sylvatica*) in rice (*Oryza sativa*) pre-planteing. *Crop Protection*, 18: 245-251.

Finassi, A. Airoldi, G., Balsari, P. & Ferrero, A. 1996. Contenimento del riso crodo con interventi meccanici. *Proc. Giornate Fitopatologiche, Numana*, 1996. 1: 413-420.

Fischer, A.J & Ramirez, A. 1993. Red rice (Oryza sativa): competition studies for management decisions. *Int. J. Pest Management* 39: 133-138.

Fischer, A.J. 1999. *Problems and opportunities for managing red rice in Latin America*. Report of the global workshop on red rice control. 30 August-3 September, Varadero, Cuba. 77-85.

Fletes, M.S. 1999. *Evaluation de la maleza arroz rojo (Oryza sativa) en las principales zonas arroceras de Nicaragua*. Report of the global workshop on red rice control. 30 August-3 September, Varadero, Cuba. 41-44.

Footitt, S. & Cohn, M.A. 1992. Seed dormancy in red rice. VII Embrio acidification during dormancy-braking and subsequent germination. *Plante Physiolog*, 100, 1196-1202.

Footit, S. & Cohn, M.A. 1995. Seed dormancy in red rice (*Oryza sativa*) IX. Embrio fructose-2,6-bisphosphate during dormancy breaking and subsequent germination. *Plante Physiology* 107, 1365-1370.

Fujimoto, H., Itoh, K., Yamamoto, M., Kyozuka, J. & Shimamoto, K. 1993. Insect-resistant rice generated by introduction of a modified delta-endotoxin gene of *Bacillus thuringiensis*. *Biol. Technology*, 11: 1151-1155.

Garcia de la Osa, J. & Rivero, L.E. 1999. *El arroz rojo. Estudios y perspectivas de su manejo en la produccion arrocera cubana*. Report of the Global Workshop on Red Rice Control, 30 August-3 September, Varadero, Cuba. 25-31.

Gealy, D.R, Saldain, N.E, Talbert, R.E. 2000. Emergence of red rice (*Oryza sativa*) ecotypes under dry-seeded rice (*Oryza sativa*) culture. *Weed Tech.* 14: 406-412.

Ghesquière, A. 1999. *Report to European Commission of the research project biology and control of red rice*, FAIR CT 1496, coordinated by Ferrero, A.

Goss, W.L., & Brown, E. 1939. Buried red rice. *J. of American Society of Agronomy* 31: 633-637.

Griffin, J.L. & Harger, T.R. 1990. Red rice (*Oryza sativa*) control options in soybeans (*Glycine max*). *Weed Tech.* 4: 35-38.

Hoagland, R.E. & Paul, R.N. 1978. A comparative study of red rice and several commercial rice (*Oryza sativa*) varieties. *Weed Sci.* 6: 619-625.

Holm, L.R. Doll, J., Holm, E., Pancho, J. & Herberger, J. 1997. The Wild rices. *Oryza sativa* L., *Oryza punctata* Kotschy ex Steud., *Oryza rufipogon* Griff., *Oryza barthii* A. Chev. (syn. *O. breviligulata* A. Chev. Et RocRH) and *Oryza officinalis* Wall ex Watt. In *World weeds. Natural histories and distribution*. New York, John Wiley and Sons, Inc. 531-547.

Katayama, T. 1969. *Botanical studies in the genus Oryza. Part II: Germination behaviour*. Memoirs Faculty Agriculture, Kagoshima University. 7, 89-119.

Katayama, T. 1974. Photoperiodism in the genus Oryza. IV. Combinations of plante age day length and number of treatments. *Proc. Crop Science Society Japan*, 43, 224-236.

Khodayari, KR., Smith, J.R., Jr. & Black, H.L 1987. Red rice (*Oryza sativa*) control with herbicide treatments in soyabeans (*Glycine max*). *Weed Sci.* 35: 127-129.

Khush, G.S. 1997. Origin, dispersal cultivation and variation of rice. *Plante molecular biology*, 35: 25-34.

Klosterboer, A. 1978. Red rice control in Texas. In *Red rice: Research and Control*. Texas Agriculture Experimental Station, Bulletin 1270.

Kwon, S.L., Smith, R.J., Jr. & Talbert, R.E. 1991a. Interference of red rice (*Oryza sativa* L.) densities in rice (*Oryza sativa* L.).*Weed Sci.* 39: 197-174.

Kwon, S.L., Smith, R.J., Jr. & Talbert, R.E. 1991b. Interference and duration of red rice (*Oryza sativa* L.) in rice (*Oryza sativa*). *Weed Sci.* 39: 363-368.

Kwon, S.L., Smith, R.J., Jr. & Talbert, R.E. 1992. Comparative growth and development of red rice (*Oryza sativa*) and rice (*O. sativa*). *Weed Sci.* 40: 57-62.

Langevin, A.S., Clay, K. & Grace, B.J. 1990. The incidence and effect of hybridization between cultivated rice and its related weed, red rice (*Oryza sativa* L.). *Evolution* 44: 1000-1008.

Leitao, H.N., Banzato, N. & Azzini, L. 1972. Estudio de competicao entre o arroz vermelho e o arroz cultivado. *Bragantia* 31: 249-258.

Leopold, A.C., Glenister, R. & Cohn, M.A. 1988. Relationship between water content and after-ripening in red rice. *Physiologia Plantearum* 74: 659-662.

Linscombe, S.D., Jodary, F., Christou, P., Braverman, M.P., Oard, J.H. & Sanders, D.E. 1996. Potential for the use of transgenic rice for the control of Oryza sativa and other rice weeds. *Proc. 2nd Int.Weed Control Congress, Copenhagen,* 435-439.

Johnson, D.E., Riches, C.R., Kayeke, J., Sarra, S. & Tuor, F.A. 1999. *Wild rice in sub-Saharan Africa: its incidence and scope for improved management.* Report of the global workshop on red rice control, 30 August–3 September, Varadero, Cuba. 87-93.

Majisu, B. 1970. A potential dangerous weed of rice in East Africa. *East African Agriculture and Forestry Research Organization., Newsletter 60.* Nairobi.

Messeguer, J. 2002. Field assessment of gene flow from transgenic rice to cultivated and red rice. *Proc. of Riceuconf Dissemination Conference of current European Research on Rice. Turin,* 16-17 bis.

Minton, B.W., Shaw, D.R. & Kurtz, M.E. 1989. Postemergence grass and broadleaf herbicide interactions for red rice (*Oryza sativa*) control in soybeans (*Glycine max*). *Weed Tech.* 3: 329-334.

Nagao, S. & Takahashi, M. 1963. Trial construction of twelve linkage group in Japanese rice. *J. Fac. Agric. Hokkaido Univ.,* 53: 72-130.

Noldin, J.A., Chandler, J.M., McCauley, G.N. & Sij, J.W. 1998. Red rice (*Oryza sativa*) and *Echinochloa* spp. control in Texas Gulf coast soybean (*Glycine max*). *Weed Tech.* 12: 677-683.

Noldin, J.A. & Cobucci, T. 1999. Red rice infestation and management in Brasil. *Report of the global workshop on red rice control, 30 August-3 September, Varadero, Cuba.* 9-13.

Oard, J., Cohn, M.A., Linscombe, S., Gealy, D. & Gravois, K. 2000. Field evaluation of seed production, shattering and dormancy in hybrid populations of transgenic rice (*Oryza sativa*) and the weed, red rice (*Oryza sativa*). *Plante Science* 155: 13-22.

Olofdotter, M., Valverde, B.E. & Madesen, K.H. 1999. *Herbicide-resistant rice* (*Oryza sativa* L.) *– A tRHeat or a solution.* Report of the Global Workshop on Red Rice Control, 30 August-3 September, Varadero, Cuba. 9-3, pp. 123-145.

Pantone, D.J. & Baker, J.B. 1991a. Weed-crop competition models and response-surface analysis of red rice competition in cultivated rice: a review. *Crop Science* 31 (5): 1105-1110.

Pantone, D.J. & Baker, J.B. 1991b. Reciprocal yield analysis of red rice (*Oryza sativa*) competition in cultivated rice. *Weed Sci.* 39: 42-47.

Pantone, D.J., Baker, J.B. & Jordan, P.W. 1992. Path-analysis of red rice (*Oryza sativa* L.) competition with cultivated rice. *Weed Sci.* 40, 313-319.

Parker, C. & Dean, M.L. 1976. Control of wild rice in rice. *Pesticide Science* 7: 403-416.

Quan, H.Q. 1999. *Improve rice yield potential on intensive integrated and and mechanized cultivation in Song Han state farm. Fourth Rice variety improvement in Mekong delta, Canton.* Cited from Chin *et al*, 1999.

Rao, S.R. & Harger, T.R. 1981. Mefluidide-bentazon interactions on soybeans (*Glycine max*) and red rice (*Oryza sativa*). *Weed Sci.* 29: 208-212.

Rathore, K.S., Chowdhury, V.K. & Hodges, T.K. 1993. Use of bar as a selective marker gene and for the production of herbicide-resistant rice plantes from protoplasts. *Plante Molecular Biology* 21: 871-884.

Roy, S. 1921. A preliminary classification of the wild rices of the Central Provinces and Berar. *Agricultural J. India* 16: 365-380.

Sagarra, J. 1987. Importancia del conreu de l'arròs a Catalunya. Produccions i aprofitaments. In *L'arròs tecniques*, pp. 7-10. Fundacio' La Caixa, Amposta.

Saldain, N.E, Talbert, R.E., Gealy, D.R. & Guy, C.B. 1996. *Emergence of red rice ecotypes under dry- and water-seeded rice conditions.* Research Series Arkansas Agricultural Experiments Station, 70-76.

Sankula, S., Braverman, M.P., Jodari, F., Linscombe, S.D. & Oard, J.H. 1997a Evaluation of Gufosinate on rice (*Oryza sativa*) transformed with BAR gene and red rice (*Oryza sativa). Weed Tech.* 11: 70-75.

Sankula, S., Braverman, M.P., Jodari, F., Linscombe, S.D. & Oard J.H. 1997b. Response of BAR-Transformed rice (*Oryza sativa*) and red rice (*Oryza sativa*) to glufosinate application timing. *Weed Tech.* 11: 303-307.

Sastry, M.V.S., Seetharaman, R. 1973. Inheritance of grain shattering and lazy habit and their interrelationship in rice. *Indian J. Gen. Plante. Breed*, 38: 318-321.

Smith, R.J., Jr. 1981. Control of red rice (O*ryza sativa* L.) in water seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Weed Sci.* 29: 61-62.

Smith, R.J., Jr. 1992. Integrated red rice management. In *Rice in Latin America: improvement*, management and marketing, pp. 143-158. ed. Cuevas-Pérez, F. Cali Colombia. Centro International de Agricultura Tropical (CIAT) and International Rice Research Institute (IRRI).

Sonnier, E.A. 1978. Cultural control of red rice. *Proc. Red Rice Symposium*, Texas. A. and M. University, College Station, Texas.

Stroud, D. & Kempen, H.M. 1989. Wick/Wiper. In *Principles of weed control in California. California Weed Conference.* Thomson Publication, Fresno, CA, pp. 148-150.

Suh, H.S., Sato, Y.I. & Morishima, H. 1997. Genetic characterization of weedy rice (O*ryza sativa* L.) based on morpho-physiology, isozymes and RAPD markers. *Theoretical applied Genetics*, 94: 316-321.

Tang, L., Morishima, H. & Tang, L.H. 1997. Genetic characterization of weedy rices and the interference on their origins. *Breeding Science* 47: 153-160.

Tarditi, N. & Vercesi, B. 1993. Il riso crodo: un problema sempre più attuale in risicoltura. *L'Informatore Agrario* 11: 91-95.

Vaughan, L.K., Ottis, B.V., Prazak-Havey, A.M., Bormas, C.A., Sneller, C. & Chandler, J.M. 2001. Is all red rice found in commercial rice really *Oryza sativa* ? *Weed Sci.* 49: 468-476.

Vidotto, F., Ferrero A. & Tabacchi, M. 1998. Lotta al riso crodo (*Oryza sativa* L. var. *sylvatica*) con la tecnica della falsa semina. *Proc. Giornate Fitopatologiche, Scicli e Ragusa,* 1998. 369-374.

Vidotto, F, Ferrero A. 2000. Germination behaviour of red rice (*Oryza sativa* L.) seeds in field and laboratory conditions. *Agronomie* 20: 375-382.

Vidotto, F., Ferrero, A. & Ducco, G. 2001. A mathematical model to predict the population dynamics of *Oriza sativa* var. *sylvatica, Weed Res.* 41: 407-420.

Watanabe, H., Vaughan, D.A. & Tomooka, N. 1998. *Weedy rice complexes: Case studies from Malaysia, Vietnam and Suriname.* Int. Symposium on Wild and Weedy Rices in Agro-ecosystems, 10-11 August. Ho Chi Minh city.

Wheeler, C.C., Baldwin, F.L., Gealy, D., & Gravois, K. 1997. *Weed control in Liberty-tolerant rice.* Research Series Arkansas Agricultural Experiment Station, 64-66.

Wheeler, C.C., Baldwin, F.L., Talbert, R.E. & Webster, E.P. 1998. *Efficacy of Liberty (glufosinate) in Liberty-tolerant rice.* Research Series Arkansas Agricultural Experiment Station, 330-335.

Wirjahardja, S., Guhardja, E. & Wiroatmodjo, J. 1983. Wild rice and its control. *Proc. Weed Control Rice Conference, IRRI, Philippines.*

Progrès enregistrés dans la gestion des mauvaises herbes parasites

Abuelgasim Elzein and Jürgen Kroschel

INTRODUCTION

Les mauvaises herbes des familles de Orobanchaceae (*Aeginetia*, *Orobanche* communément appelé 'broomrape' en Anglais) et Scrophulariaceae (*Alectra*, *Striga* communément appelé 'witchweed' en Anglais ou herbe sorcière) sont considérées comme étant les plus néfastes au point de vue importance économique. Le genre *Striga* comprend environ 40 espèces, dont 11 sont considérées comme parasites des cultures vivrières. Le genre *Orobanche* a plus de 100 espèces, mais seulement 7 sont considérées comme économiquement nuisibles (Parker et Riches, 1993; Raynal-Roques, 1996).

Distribution géographique et principaux hôtes

Les mauvaises herbes parasites ont développé des spécificités vis à vis des cultures et des plantes dans la végétation naturelle. *Striga hermonthica* (Del.) Benth., *S. asiatica* (L.) Kuntze et *S. gesnerioides* (L.) Vatke, sont, dans l'ordre au point de vue économique, les espèces les plus importantes des régions semi arides aux régions subhumides. Les deux premières espèces sont presque entièrement spécifiques aux graminées (céréales) tels que sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), maïs (*Zea mays* L.), petit mil (*Pennisetum americanum* L.), riz (*Oryza sativa* L.), canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) et autres, tandis que la troisième parasite des hôtes dicotylédones, principalement niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), tabac (*Nicotiana tabacum* L.) et patate douce (*Ipomea batatas* (L.) Lam.) (Ejeta *et al.* 1992). L'Afrique est décrite comme étant l'origine des espèces de *Striga* les plus importantes en agriculture, particulièrement la région Soudano-Ethiopienne qui est également considérée comme étant l'origine du sorgho (Vasudeva Rao et Musselman, 1987). L'espèce *S. hermonthica* est largement répandue dans les zones semi-arides au Nord de l'Afrique tropicale; et on la trouve aussi dans le sud-ouest de la Péninsule arabique (Mohamed *et al.* 2001). Par contre l'espèce *S. asiatica* a une large distribution dans les parties Est et Sud de l'Afrique, de l'Asie, de l'Australie et des Etats Unis (Musselman, 1987). La troisième espèce, *S. gesnerioides*, se rencontre en Afrique, dans la Péninsule Arabique, dans le Sous-continent Indien, et a été introduite aux Etats Unis (Musselman et Parker, 1981).

Les espèces du genre *Alectra* se rencontrent principalement en Afrique tropicale et dans la partie subtropicale au sud de l'Afrique. *A. sessiliflora* et *A. fluminensis* se rencontrent aussi en Asie subtropicale et dans les régions tropicales et subtropicale de l'Amérique du Sud, respectivement (Parker et Riches 1993). *A. vogelii* Benth. est la plus importante espèce parasitant principalement les légumineuses à graines en Afrique Subsaharienne comme le niébé (*Vigna unguiculata)*, le voandzou (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.), le soja (*Glycine max* (L.) Merr.), 'le haricot mungo' (*Vigna radiata* (L.) Wilczek), l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) et le haricot ordinaire (*Phaseolus vulgaris* L.).

La région méditerranéenne est considérée comme l'un des centres d'origine des espèces d'*Orobanche*. Les espèces sont largement reparties à travers le monde, des climats tempérés jusqu'aux tropiques semi-arides. La distribution de *Orobanche crenata* Forsk est limitée aux régions méditerranéennes, au Moyen Orient et à l'Afrique de l'Est (Ethiopie), tandis que d'autres espèces sont plus largement répandues. Aujourd'hui, les espèces *O. crenata*, *O. ramosa* L., *O. aegyptiaca* Pers., *O. cernua* Loefl., *O cumana* Wallr., *O. minor* Sm. et *O. foetida* Poir. sont parmi les principaux facteurs biotiques limitant la production de

légumineuses tels que *Vicia faba* L., *Cicer arietinum* L., lentille (*Lens culinaris* Medick.), et des cultures de la famille des Solanaceae [tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), et tabac (*Nicotiana tabacum* L.)] et des Asteraceae, principalement le tournesol (*Helianthus annuus* L.) (Parker et Riches, 1993).

Cycle de vie

Les semences des mauvaises herbes parasites des racines varient dans leur aptitude à germer immédiatement après qu'elles ont atteint la maturité. Les semences de *Striga* et d'*Orobanche* sont dormantes et requièrent une période de post-mûrissement appelée période de maturité post- récolte, alors que les semences de *Alectra vogelli* peuvent germer immédiatement après la récolte si les conditions requises sont réunies (Riches, 1989). La germination des semences a lieu quand les graines mûres sont pré-conditionnées par exposition à des conditions de température et d'humidité élevées pendant plusieurs jours, suivie de signaux chimiques exogènes produits par les racines de l'hôte et de quelques non-hôtes (stimulant de germination) (Worsham, 1987). Dès la germination, la radicule qui est proche des racines subit une élongation vers la racine de l'hôte, développe un organe de fixation, l' haustorium qui sert de pont entre le parasite et son hôte, et le prive d'eau, les sels minéraux et les hydrates de carbone, entraînant ainsi un stress hydrique et un flétrissement de l'hôte. Le rabougrissement des plantules, la nécrose des feuilles et la réduction de la photosynthèse sont les symptômes qui peuvent être observés sur les plantes hôtes susceptibles et qui contribuent à la réduction du rendement grain (Frost *et al.* 1997). La plupart des graines dans le sol ne seront pas en contact avec le stimulant mais resteront viables jusqu'à 15 ans, formant un réservoir de semences pour les prochaines saisons de culture. La pénétration des cellules de l'haustorium dans le tissu de l'hôte (système xylème et/ou phloème) est faite mécaniquement par pression sur les cellules endodermiques de l'hôte et par les enzymes d'hydrolyse. Le conditionnement, la germination, le contact du parasite (fixation) et la pénétration sont sous la médiation d'un élégant système de communication chimique entre l'hôte et le parasite (Maass, 1999). Après plusieurs semaines de croissance souterraine, le parasite émerge à la surface du sol et commence à fleurir et a produit des graines après une autre courte période de temps. La production de semences est prodigieuse, jusqu'à 100.000 graines où plus peuvent être produites par une seule plante et conduit à une ré-infestation du champ. Ainsi, si des plantes hôtes sont fréquemment cultivées, la population de semences dans le sol augmente énormément et la culture des plantes hôtes devient de moins en moins économique (Kroschel, 2001).

Importance agronomique et pertes de rendement

Une considérable perte en croissance et en rendement de plusieurs cultures vivrières et fourragères est causée par les plantes parasites à fleurs. Globalement, les espèces du *Striga* ont un impact plus grand que n'importe quel autre angiosperme parasite sur le bien-être de l'homme parce que leurs hôtes sont des cultures de subsistance dans des zones marginales pour l'agriculture. En général, une faible fertilité du sol, la carence en azote, des sols bien drainés et le stress hydrique accentuent la sévérité des dégâts causés par le *Striga* à la plante hôte. Ce sont là les conditions de milieu typiques pour les plantes hôtes du *Striga* dans les tropiques semi-arides et sub-humides. De nos jours, le *Striga* est considéré comme l'unique et la plus grande contrainte biotique à la production vivrière en Afrique où la vie d'une population de 300 millions d'habitants est malheureusement affectée. Dans les zones infestées, les pertes de rendements liées aux dégâts du *Striga* sont souvent très importantes, allant de 40 à 100%. (Bebawi et Farah, 1981; Lagoke *et al.* 1991; Ejeta *et al.* 1992). En outre, il est estimé que la production future de grains en Afrique, est soumise à un risque croissant. Ceci, parce que plusieurs facteurs influencent l'apparition et peuvent accélérer l'expansion future et l'intensité de l'infestation par les espèces de *Striga* dans les systèmes de culture en agriculture. Cela implique l'adaptation future de *Striga* aux cultures et à de une large

amplitude écologique et une baisse de la fertilité des sols dans les sols tropicaux (Kroschel, 1998). Les importantes réductions de rendements ont pour conséquence qu'il y a peu, ou pas du tout de nourriture pour des millions d'agriculteurs de subsistance et par conséquent aggravent la faim et la pauvreté.

Alectra vogelii est un sérieux nuisible dans la production du niébé en Afrique. L'infection du parasite ne diminue pas la production de matière sèche, mais modifie sérieusement la répartition de la matière sèche, en augmentant la proportion de matière sèche des racines (Rambakudzibga *et al.* 2002). Les pertes de rendements occasionnées par l'infestation de *A. vogelii* vont de 41 % à la perte totale s de rendement pour les cultivars très sensibles (Lagoke *et al.* 1993). La réduction de rendement se produit à travers le retard de floraison, une réduction du nombre de fleurs et de gousses, et une réduction de la masse des gousses et du grain (Mugabe, 1983).

Les dégâts causés par les plantes parasites du genre *Orobanche* au champ et dans les cultures maraîchères sont importants dans le Proche Orient, à l'est et au sud de l'Europe, et dans de nombreuses Républiques de l'ex-Union Soviétique. Ils causent des pertes de rendements allant de 5 à 100% (Linke *et al.* 1989). Par exemple, au Maroc, l'infestation de *O. crenata* dans les légumineuses alimentaires ont causé des pertes de rendements de l'ordre 32,7 % en moyenne dans 5 provinces en 1994, ce qui équivalait à une perte de production de 14.389 tonnes, soit 8,6 millions de US$ (Geipert *et al.* 1996). Comme conséquence de la complète dévastation causée par *Orobanche* en plusieurs endroits, les méthodes de productions doivent être modifiées et/ou la culture de quelques hôtes sensibles doit être abandonnée.

Les méthodes de contrôle: possibilités et contraintes

Comparé aux mauvaises herbes non parasites, il a été prouvé que le contrôle des mauvaises herbes parasites est extrêmement difficile. L'aptitude du parasite à produire énormément de graines, qui peuvent rester viables dans le sol pendant plusieurs années, et leur intime inter action physiologique avec leurs plantes hôtes, sont les principales difficultés qui limitent le développement de méthodes de contrôle efficaces qui peuvent être acceptées et utilisées par les agriculteurs de subsistance. Cependant, plusieurs méthodes de contrôle des mauvaises herbes parasites ont été testées incluant les méthodes culturales et mécaniques (rotation des cultures, cultures de faux hôtes et cultures pièges cultures pièges, la jachères, l'arrachage manuel, la fertilisation azotée, le calendrier et le mode de semis, les cultures associées et les cultures mixtes), physique (solarisation), chimiques (herbicides, stimulants artificiels de germination , par exemple l'éthylène, l'éthephon, le strigol), l'utilisation de variétés résistantes et la lutte biologique. Ces différentes méthodes de contrôle ont été passées en revue par Parker et Riches (1993), et récemment synthétisées par Kroschel (2001), et Omanya (2001). Au niveau des producteurs, la gestion des mauvaises herbes parasites n'est toujours pas satisfaisante (à l'exception de l'utilisation du glyphosate dans la culture de *Vicia faba* pour le contrôle de *O. crenata*) d'autant que les présentes méthodes de contrôle ne sont pas assez performantes pour contrôler le stade de développement souterrain des parasites. Présentement, la réhabilitation des champs infestés peut réussir seulement, à travers l'amélioration des systèmes traditionnels basée sur une analyse solide du problème des mauvaises herbes parasites et le développement à long terme d'un programme de contrôle durable, qui consisterait en des approches de contrôle plus applicables et compatibles avec les systèmes traditionnels existants, et avec la préférence et le revenu du paysan (Kroschel, 1999). Le succès des méthodes culturales devient évident seulement avec le temps, et n'améliorera pas les rendements des cultures présentes, à cause, aussi bien de la longue phase de développement souterrain que de la grande production et longévité des semences des parasites (Parker et Riches, 1993). Le revenu des agriculteurs de subsistance est généralement trop bas pour justifier l'utilisation d'intrants techniques très sophistiqués, tels que l'éthylène pour stimuler la germination des semences de *Striga*, comme c'est le cas en Caroline du Nord pour

l'éradication du *S. asiatica*, ou avec la solarisation du sol. En plus du coût, la sélectivité, la courte période de rémanence et la disponibilité sont les contraintes majeures qui limitent l'utilisation des herbicides. En plus, l'utilisation des stimulants synthétiques de germination et l'application de fortes doses d'engrais azotés (plus de 80 kg/ha, principalement sous forme de sulfate d'ammoniaque ou d'urée), ne sont pas facilement applicables dans les systèmes de culture en Afrique (Kroschel *et al.* 1997). Quelques lignées résistantes pour certaines associations hôte-parasite sont rapportées (Lane *et al.* 1997), mais, la résistance est souvent interférée par la grande diversité génétique des parasites. De récents succès ont été obtenus par la lutte biologique, mais, elle n'a pas conduit à une application pratique au champ dû aux difficultés liées à l'élevage en masse, le lâcher, le système de formulation et de distribution. Le principal objectif de ce chapitre est résumer le progrès accompli récemment dans la gestion des mauvaises herbes parasites. Des stratégies sur comment utiliser ce progrès pour formuler des méthodes de contrôle réussies, qui sont économiquement accessibles et qui sont acceptées par les agriculteurs de subsistance seront proposées.

AVANCEES DANS LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES PARASITES

Progrès dans la lutte culturale: pratiques indigènes et amélioration possible

Transplantation

A certaines régions d'Afrique et d'Asie, la transplantation est une pratique traditionnelle en culture de sorgho et de mil, soit pour combler les trous après l'émergence des cultures et le démariage, soit pour compenser une période de croissance qui est trop courte pour un cycle complet de culture (Rehm, 1989). Cependant, la transplantation du maïs n'a pas été pratiquée en conditions pluviales des tropiques et des sub-tropiques, probablement à cause du manque d'une technique appropriée, du manque d'irrigation pour contrôler l'humidité au moment de la transplantation. La transplantation de l'hôte pourrait être une méthode efficace dan la gestion du *Striga* parce que les plantules de la culture seraient plus âgées et plus résistantes à l'attaque du *Striga*. Cechin et Press (1993) ont découvert que peu de plantes de *Striga* étaient fixés, et peu de dégâts étaient causés sur l'hôte avec l'augmentation de l'âge du sorgho. Dans des expérimentations in vitro, il a été rapporté que la germination et le développement souterrain de *Striga hermonthica* était faibles sur sorgho transplanté, comparé au sorgho semé directement (Dawoud *et al.* 1996). La méthode a sensiblement réduit les dégâts causés par le *Striga* au sorgho, et a augmenté le rendement de la culture. Plus récemment, Oswald *et al.* (2001) ont évalué l'effet de la transplantation du maïs et du sorgho sur le rendement en grain et le parasitisme du *Striga* en condition pluviale à l'ouest du Kenya. Ils ont obtenu une augmentation significative du rendement du maïs transplanté et moins de fixation et d'émergence de *Striga* comparativement au semis-direct. Cependant, le sorgho transplanté n'a ni réussi à réduire l'émergence du *Striga*, ni améliorer le rendement en grain. De façon remarquable, de faibles densités de *Striga* ont été observées quand les plantules de maïs avaient 17 jours à la transplantation. Avec l'augmentation de l'âge des plantules de maïs, une plus grande réduction du niveau d'infestation du *Striga* a été enregistrée.

On pourrait conclure que la transplantation du sorgho et du maïs semble être une méthode possible, qui pourrait conduire à l'augmentation à la tolérance à l'infestation des cultures par le parasite. La méthode est simple et exige peu de technicité pour sa mise en application, de telle façon qu'elle peut être utilisée par les agriculteurs de subsistance et leurs familles. A cause de son exigence élevée en main d'œuvre, la transplantation du maïs en conditions pluviales est probablement indiquée seulement pour les petites superficies (0,1 ha), qui sont hautement infestées par le *Striga*. Dans ces conditions, les rendements des cultures peuvent être plus que doublés. Le bénéfice à l'utilisation de cette méthode par les petits fermiers serait que, le principal capital à risque est leur propre travail. La transplantation du maïs pourrait être

étendue aux grandes fermes à production mécanisée, si les résultats positifs de la transplantation du maïs développée par Scheffer (1988) en Allemagne pouvaient être adaptés en conditions pluviales. Cependant, l'installation des pépinières et la programmation des opérations de transplantation exige un certain niveau de gestion de la ferme qui pourrait limiter l'adoption de cette technique.

Rotation des cultures avec des faux hôtes et des cultures pièges

La rotation des cultures avec des faux hôtes et des cultures pièges a été depuis longtemps proposée et pratiquée comme mesure de contrôle des mauvaises herbes parasites. En ce qui concerne le contrôle du *Striga*, la plus favorable rotation culturale est la rotation avec un faux hôte faux hôte; une culture qui stimule la germination des graines du *Striga* mais qui ne peut pas être infectée par le parasite. Les faux hôtes les plus prometteuses rapportées pour les espèces de *Striga* et d'*Orobanche* ont été récemment énumérées par Kroschel (2001). Il est évident que les fermiers des pays ou des régions où, des possibilités de commercialisation de faux hôtes comme le coton et le soja, ont un grand avantage à l'adoption de tels systèmes de cultures (Kroschel et Sauerborn, 1996). Il a été conclu qu'il existe de grandes différences entre les cultivars dans leur aptitude stimuler la germination et que la caractérisation et la recommandation des meilleurs cultivars devraient être une activité de routine pour les chercheurs axés sur les zones infestées par le *Striga* et *Orobanche* (Berner *et al.* 1995). On devrait aussi avoir à l'esprit que, les fermiers préfèrent plusieurs caractéristiques dans un cultivar donné, tel qu'un potentiel de rendement élevé, la précocité, la couleur, le temps de cuisson etc., qui doivent être pris en compte dans les recommandations pour les fermiers (Ramson, 1999). Les cultures pièges sont des cultures sensibles au parasite et qui deviendront infectées. Avant que le parasite n'ait la chance de fleurir, le fermier devrait arracher la culture piège pour détruire le parasite. La culture piège la plus prometteuse pour le contrôle du *S. hermonthica* est l'herbe du Soudan (*Sorghum sudanense* L.) (Last, 1961, Oswald *et al.* 1999). Cependant, la culture piège est rarement utilisée par les petits fermiers pour le contrôle du *Striga*, parce que la technique n'est pas connue ou comprise et possède de sérieux désavantages quand elle n'est pas adaptée à un système de culture spécifique (Oswald *et al.* 1999). Malgré plusieurs rapports relatifs aux succès, il a été montré à travers les années que seulement ces deux méthodes (faux hôtes et cultures pièges) ont seulement un effet raisonnable dans les zones où le niveau d'infestation du sol par le parasite est très bas. Malheureusement, les expériences à l'Est du Kenya ont montré que même après quatre ans de culture continue avec le niébé ou le coton, des niveaux de dégâts du *Striga* subsistent encore dans le sol (Odhiambo et Ransom, 1996).

Association culturale

L'association culturale des céréales avec des légumineuses et d'autres cultures est une pratique courante dans la plupart des zones en Afrique, et a été rapportée comme ayant un effet sur l'infestation du *Striga*. Au Kenya, des résultats récents ont montré que l'association culturale du maïs avec le niébé et la patate douce peut significativement réduire l'émergence du *Striga* (Oswald et *al.* 2002). Plus récemment au Kenya, on a découvert que l'inhibition du *Striga hermonthica*, a été plus importante dans l'association du maïs avec le Desmodium [*Desmodium uncinatum* (Jacq.) DC.] que dans ce qui a été observé avec les autres légumineuses telles que le crotalaire (*Crotalaria* spp.), le soja ou le niébé (Khan *et al.* 2000). En conséquence, le rendement du maïs a significativement augmenté de deux tonnes par ha. Les espèces de *Desmodium* sont des légumineuses qui peuvent facilement être contrôlées par des coupes régulières en vue d'empêcher ou de minimiser la compétition avec la culture s'il y a lieu. On a découvert que les mécanismes par lesquels *D. uncinatum* réduit les infestations du *Striga* en association culturale sont les effets allélopathiques qui inhibent le développement des haustoria du *Striga* (Khan *et al.* 2001). L'identification des composés libérés par *D. uncinatum* qui ont entraîné la suppression du parasite peut conduire à une plus grande

exploitation pour le développement de stratégies plus fiables en matière d'association culturale, de même que les nouvelles approches pour la biologie moléculaire dans le cas du *S. hermonthica* (Gressel, 2000). En conclusion, l'association culturale a un potentiel pour réduire l'infestation et la reproduction du *Striga*.

Les jachères aménagées comme une nouvelle technique de gestion du Striga

Les jachères aménagées sont un nouveau concept qui est entrain d'être introduit dans les zones où les sols sont sévèrement dégradés. Les légumineuses, arbres et arbustes possèdent plusieurs avantages pour être utilisées dans les jachères aménagées. Une fois établies, certaines espèces ont besoin de très peu de gestion et peuvent produire du bois de chauffe et du fourrage pour certaines espèces, tout en améliorant significativement le statut de l'azote du sol. (Rao et Gacheru, 1998). Les arbres à buts multiples cultivés dans les fermes (agroforesterie) peuvent avoir un potentiel d'accroissement de la fertilité des sols et/ou occasionner une germination suicidaire des graines de *Striga* et par conséquent aider à la réduction du niveau d'infestation par le *Striga*. Un certain nombre d'espèces d'arbres ont été identifiées comme de bons candidats à la jachère aménagée et ont montré leur aptitude à stimuler la germination du Striga dans des expérimentations en pots ou in vitro dans des chambres à racines (Oswald *et al.* 1996). *Sesbania sesban* (L.) Merr. est la plus prometteuse aussi bien en terme de facilité d'installation que, plus tard, en terme de facilité d'enlèvement du champ, de même que comme stimulant de germination du *Striga* (ICRAF 1996). Les tests ultérieurs de laboratoire effectués par (Rao et Gacherou 1998) ont confirmé le potentiel d'un certain nombre d'espèces d'arbres/arbustes dans la stimulation de la germination des semences pré-conditionnées du *Striga*. Les espèces les plus prometteuses au cours des tests furent *Senna* spp., *Crotalaria agatiflora* Schweinf., et *C. grahamiana* Wight et Arn., *Calliandra calothyrsus* Meis, *Lencaena leucocephala* (Lam.) de Wit, et *Desmodium distortum* (Aubl.) Macbr. Dans les essais en milieu réel au Kenya, les mêmes auteurs rapportent moins d'infestation de *Striga* sur maïs après 12 mois de jachère de *Sesbania* spp., *S. didymobotrya* (Fresen.), *Tephrosia vogelii* (Hemsley) A. Gary, *C. grahamiana*, et *D. distortum*, plutôt qu'après jachères naturelles. En champ, à l'Est de la Zambie, le maïs après trois ans de jachère de *Sesbania sesban*, *Lencaena leucocephala* et *Senna siamea* (Lam.) H.S. Irwin et Barneby n'a montré aucune infestation de *S. asiatica* (ICRAF, 1996).

Selon Rao et Gacheru (1998), les jachères améliorées par l'adoption de technologie agroforestière réduisent l'infestation par le *Striga* par certains ou tous les mécanismes suivants:

- les arbres dans le système de jachère agissant comme faux hôte et entraînant une germination suicidaire des graines de *Striga*;
- l'augmentation de l'azote minéral à la surface du sol à la fin des jachères, minéralisation de l'azote pour la période suivante de cultures;
- la production de stimulant de germination du *Striga* dans le processus de décomposition de la litière de feuilles;
- une activité microbienne accrue qui suit l'incorporation des résidus organiques affectant le conditionnement et la viabilité des graines dans le sol; et
- l'amélioration de la fertilité du sol permettant aux plantes de maïs de mieux faire la compétition avec le *Striga* et de réduire ses dégâts. Ainsi, un système d'agroforesterie approprié peut fournir une importante stratégie supplémentaire pour réduire la banque de semences à travers une germination suicidaire, même pendant la jachère.

Progrès dans le contrôle chimique: accessibilité et faisabilité économique

Herbicides

Pour être bénéfiques et efficaces au cours de la saison de croissance, les herbicides pour le contrôle des mauvaises herbes parasites des racines, qui sont caractérisés par un long stade de développement souterrain, peuvent être appliqués en pré ou post levée des cultures, mais toujours en pré-levée des parasites. Au cours des dernières décades, quelques et interventions chimiques potentiellement utiles sont devenues disponibles pour le contrôle des mauvaises herbes parasites (Garcia-Torres, 1998). Cependant, l'absence de technologie d'application, la sélectivité marginale des cultures, une faible rémanence et la disponibilité sont les s contraintes majeure qui limitent la réussite de l'utilisation des herbicides dans les pays en développement où le revenu des agriculteurs de subsistance est habituellement très bas pour leur permettre de les acquérir.

***Striga*:** Le dicamba comme herbicide de post-levée, s'est montré capable de contrôler le *Striga* quand il est appliqué tôt après la fixation, mais le timing est très critique pour maximiser son efficacité, aussi bien en terme de contrôle du *Striga*, qu'en terme de la sécurité de la culture (Odhiambo et Ransom, 1997). Le 2, 4-D est l'herbicide le plus largement utilise pour prévenir la production de graines de *Striga*. Donc, l'herbicide doit être directement pulvérisé sur les parasites plusieurs fois au cours de la saison de croissance, parce que les plantules de Striga qui sont encore dans leur stade souterrain ne sont pas affectées (Pare *et al.* 1996). Néanmoins, à cause de son faible sélectivité, 2, 4-D ne peut pas être utilisé en association culturale.

Les traitements des semences commerciales avec les fongicides et les insecticides sont très couramment utilisés en agriculture moderne. Cependant, les traitements herbicides des semences n'ont pas encore été commercialement développés et pourraient être intéressants dans le cas des mauvaises herbes parasites, puisque les infections parasitaires se font seulement par le système racinaire des plantes hôtes. Une issue intéressante des récents efforts a été la sortie des herbicides inhibiteurs de la synthèse de acetolactate (ALS)- comme enrobage de semences sur les génotypes de maïs qui possède une résistance au site cible. L'avantage de ces génotypes de maïs permet l'utilisation de la large famille d'herbicides efficaces contre le *Striga* qui autrement auraient tué le maïs. Parmi ces herbicides, imazapyr et pyrithiobac, qui étaient sans danger au -maïs ALS -résistant comme solution de trempage, amorce, enrobage ont été trouvés capables de fournir un contrôle excellent et efficace contre le *Striga* (Kanampiu *et al.* 2001a). Même en cas d'infestation sévère par le *Striga*, ces traitements peuvent améliorer au triple les rendements du maïs (Abayo *et al.* 1998). Dans les investigations ultérieures de laboratoire, la destruction presque complète des graines viables dans les dix premiers centimètres de sol, et 80 % de suppression de la germination des semences à 30 cm de profondeur a été rapporté quand les semences de maïs résistant à l'imidazolinone ont été enrobées par imazapyr et pyrithiobac (IR) (Kanampiu *et al.* 2001b). La translocation systémique des deux herbicides, et leur exsudation des racines de maïs furent aussi confirmées par la destruction des *Striga* déjà fixés et la destruction de la banque de semences dans le sol, respectivement. Cependant, le mouvement des herbicides dans le profil du sol peut causer un effet préjudiciable aux cultures sensibles en association, d'autant plus que l'association culturale des hôtes de *Striga* est ordinairement pratiquée en Afrique. Cependant, le niébé et V*igna radiata* L. sensibles à l'imazapyr et au pyrithiobac ne furent pas affectés quand ils ont été semés en association dans le champ à plus de 15 cm des semences de maïs enrobées avec 0.4 mg de m.a de. pyrithiobac et 0.84 mg m.a d'imazapyr par graine de semence, respectivement (21 et 45 g m.a. ha^{-1}), le double de la dose recommandée. Puisque La technique est sécurisante pour la culture associée, puisque ces légumineuses sont typiquement semées à équidistance entre les poquets de maïs sur la ligne (par exemple à 30 cm de chaque poquet), ou bien entre les lignes du maïs (espacées de 75 cm). La simplicité de

la technique, son adaptabilité aux méthodes agronomiques du contrôle du *Striga*, et, plus spécialement sa compatibilité avec le système de culture associée pourraient contribuer à une application plus significative d'une approche intégrée de méthodes de contrôle du *Striga* dans le futur, pourvu que la résistance aux herbicides ne soit pas développée par de nouvelles races de *Striga*. Cependant, actuellement, ce n'est pas une option pour les fermiers sans ressources. La poursuite de l'exploitation des techniques du génie génétique dans les cultures, pour obtenir des plantes résistantes aux herbicides élargira l'utilisation d'herbicides sans danger, et fournira à un prix raisonnable, un contrôle à large spectre des mauvaises herbes parasites.

Orobanche: Plusieurs tentatives et une recherche intensive ont été faites dans différents pays pour la sélection d'herbicides potentiels contre *Orobanche*. En général, le facteur le plus limitant dans l'utilisation des herbicides prometteurs est leur degré de sélectivité vis à vis des cultures à la dose recommandée pour le contrôle des parasites, et la période critique d'application, spécialement des herbicides systémiques d'application foliaire. Cependant, le glyphosate est le premier herbicide développé pour le contrôle de *Orobanche crenata* dans *Vicia faba* L. (Schmitt *et al.* 1979), et il est toujours l'herbicide le plus important et le plus utilisé. Depuis lors, un nombre considérable d'études a été effectué pour essayer de clarifier la sélectivité et l'utilisation du glyphosate dans les légumineuses et les cultures autres que *V. faba* qui sont des hôtes sensibles d'*Orobanche*. Un certain niveau de réussite a été atteint dans certaines cultures dans des conditions spécifiques tels que, le temps et la dose d'application. Ainsi, les cultures pour lesquelles, l'usage de glyphosate est bien confirmé, jusqu'ici, incluent *V. faba*, la carotte (*Daucus carota* L.) et le céleri (*Apium graveolens* L.). Cependant, l'augmentation de rendement correspondante n'est pas consistante, spécialement en condition de forte infestation. En plus du glyphosate, d'autres herbicides par exemple sulfonylurée, imazethapyr et imidazolinone ont prouvé leur efficacité dans plusieurs cultures hôtes, tant en phase de démonstration qu'en phase de commercialisation à plusieurs endroits au Proche Orient (Israël, Jacobsohn, 2002) et dans la Région Méditerranéenne (Espagne, Garcia-Torres *et al.* 1999). Il a été prouvé que la phytotoxicité de certains herbicides de post-levée sur les cultures peut être évité ou réduit en modifiant leur technique d'application et d'émission. Par exemple, par chimigation du chlorsulfuron et du triasulfuron dans le sol, *O. aegyptiaca* peut être efficacement contrôlé et le rendement de la tomate augmenter sans endommager la culture (Kleifeld *et al.* 1999). En Espagne, des résultats prometteurs ont été obtenus (60–80 % de contrôle de *O. crenata*) en trempant ou en enrobant les semences du *V. faba* et du pois (*Pisum sativum* L.), ou les semences des lentilles dans une faible concentration de imazethapyr ou de imazapyr, respectivement (Jurado Exposito *et al.* 1996, 1997; Garcia-Torres *et al.* 1999). La germination des semences et la croissance des plantes n'ont pas été affectées par la phytotoxicité des deux herbicides. Cependant, cette technologie n'a pas encore été développée ou optimisée pour une application à l'échelle du champ.

Stimulants de germination

L'application des stimulants de germination pour induire une germination suicide des mauvaises herbes parasites paraît attractive à cause de leur sécurité, leur décomposition dans le sol dans une période de temps courte, et de leur haute activité biologique à une dose très faible. Un exemple remarquable jusqu'ici fut l'utilisation de gaz éthylène en Caroline du Nord pour l'éradication de *S. asiatica*, par l'injection du gaz en dessous de la surface du sol, en utilisant une machinerie spéciale sophistiquée. Au niveau de la recherche, la méthode fut aussi testée en Afrique. Cependant, les résultats obtenus au Kenya donnaient seulement 50-60 % de réduction de la banque de semences, ce qui était beaucoup moins que ce qui est régulièrement obtenu aux Etats Unis (Egley *et al.* 1990). Cependant, en certains endroits de l'Afrique, l'éthylène a été trouvé plus efficace que les faux hôtes dans la réduction de la banque de semences du *Striga* (Odhiambo et Ransom, 1997). Donc son utilisation dans les zones lourdement infestées pourrait probablement être hautement économique, pourvu que les

défis de sa distribution et de son application soient résolus, puisque le coût actuel du produit chimique est bas (12,4 $ par ha) (Ransom, 1999).

Le Nijmegen 1, synthétisé récemment par Zwanenburg et Wigchert (1998) et GR 24, qui sont structuralement apparentés au stimulant naturel Strigolactone, sont les stimulants actifs de germination synthétiques les plus puissants pour plusieurs espèces de *Striga* et de *Orobanche* à faible concentration (10^{-9}–10^{-6} mol l^{-1}) (Wigchert *et al.* 1999). Le Strigolactone naturellement produit ne peut pas être isolé pour une application commerciale à cause de sa concentration extrêmement faible dans le sorgho (Wegmann, 2002). Cependant, la préparation à grande échelle de Nijmegen 1 est relativement facile et possible à bas prix, ce qui peut faciliter l'application en champ (Nefkens *et al.* 1997; Wigchert *et al.* 1999). En condition de champ, l'application de 2, 5 l m^{-2} de 50 ppm de solution de Nijmegen 1 a réduit la banque de semences de Orobanche en moyenne de 35 % (0–30 cm de profondeur) (Miele *et al.* 2001) qui correspond au maximum de germination qu'il induit *in vitro*. Une formulation correcte du stimulant pourrait peut être augmenter la distribution dans le sol et l'efficacité. Récemment, Wegmann (2002) a rapporté des résultats très prometteurs quand la formulation de Nijmegen 1 (par BASF AG), a été appliquée en conditions de champ. La connaissance approfondie du comportement de Nijmegen 1 dans le sol, tels son adsorption, sa mobilité, son devenir et comment appliquer le composé avec un volume facile à transporter peut aider à la compréhension de son efficacité relative dans différents sols et conditions environnementales (Streibig, 2002).

Progrès dans la sélection de variétés résistantes

La résistance de la plante hôte pourrait probablement être la méthode potentielle de contrôle des mauvaises herbes la plus pratique. En utilisant les approches biotechnologiques (incluant la biochimie, la culture de tissu, la génétique et la création variétale et la biologie moléculaire), un progrès significatif a été réalisé dans le développement des méthodes de criblage et de nouveaux essais de laboratoire, conduisant à l'identification des meilleures sources de résistance des hôtes aux parasites (Ejeta *et al.* 2000; Haussmann *et al.* 2000; Omanya, 2001; Mohamed *et al.* 2001). L'immunité des plantes hôtes au *Striga* ou à l'*Orobanche* n'a pas encore été découverte. Cependant, plusieurs variétés résistantes sont utilisées aujourd'hui, en plusieurs endroits d'Afrique, d'Europe et d'Asie. Comme les cultivars résistants ou tolérants rapportés ne sont pas souvent acceptés par les agriculteurs à cause de leur bas rendement, leur faible qualité de graines et de stockage, faible plasticité et sensibilité aux maladies et ravageurs, les technologies nouvellement développées contribuent à surmonter ces problèmes en permettant le transfert de gènes de résistance dans des cultivars adaptés avec un potentiel de rendement élevé. Ceci conduira à une faible infestation par les parasites et un rendement plus élevé des cultures.

Striga: La résistance au *Striga* a été documentée pour le niébé, le riz de plateau et le sorgho (Hess et Haussmann 1999). Il y a quelques années, le projet INTSORMIL PRF-213 a conduit à l'identification d'un certain nombre de variétés de sorgho à mettre à disposition pour l'agriculture commerciale dans plusieurs pays (Ejeta, 2002). En 1999, deux variétés résistantes au *Striga* furent officiellement mises à disposition pour une large culture dans les régions endémiques au Nord Ouest de l'Ethiopie. En 2002, une autre variété supérieure appelée Brhan, a tété identifiée pour une vulgarisation officielle dans la région Amhara de l'Ethiopie. En Tanzanie, deux variétés de sorgho à grains blancs, à maturité précoce et résistantes au *Striga* ont été approuvées pour une mise à disposition et cultivées dans les zones de culture du sorgho où le *Striga* est une contrainte majeure à la production. Les deux lignées (P9405 et P9406) qui ont été enregistrées sous les noms de KAKIKA et WAHI respectivement, furent développées à l'Université de Purdue, aux Etats Unis (Mbwaga et Riches, 2002). Cependant, dans les champs hautement infestés, le niveau de résistance du sorgho n'est souvent pas suffisant pour atténuer les pertes de rendement, par exemple le mécanisme de résistance de

SRN 39, qui est basée sur une faible production de stimulant, n'est pas efficace au champ avec une grande banque de semences de *Striga*.

Concernant le maïs, des progrès considérables ont été accomplis à l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) et par le Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé (CIMMYT) dans la création de variétés à pollinisation ouverte, de lignées sœurs et hybrides qui ont à la fois des symptômes de dégâts réduits sur les plantes hôtes (tolérance) et une émergence réduite dans des conditions d'infestation artificielle avec *S. hermonthica (*Kim, 1994; Berner *et al.* 1995; Lane *et al.* 1995). Certaines de ces variétés ont aussi montré un niveau de résistance modéré au *S. aspera* (Willd.) Benth. et *S. asiatica*. Des variétés résistantes adaptées aux écologies de bas-fond et d'altitude moyenne, avec une gamme de cycles de développement, couleur et texture du grain ont été créées (pour plus de détails, voir Kling *et al.* 2000). Pour s'assurer que les variétés créées sont adaptées aux circonstances des agriculteurs et satisfont les goûts des consommateurs, les meilleures variétés sont activement disséminées chez les paysans à travers les efforts des réseaux régionaux sur le maïs et le *Striga*, et plusieurs projets collaboratifs y compris le projet africain sur les stress du maïs, qui sont évalués à présent.

Concernant le riz, les lignées d'*Oryza glaberrima* 'ACC102196', 'Makassa', et 'IG 10', de même que les lignées d'*O. sativa* 'IR49255-BB-5-2' et IR47255-BB-5-4' ont montré en conditions de champ en Côte d'Ivoire une résistance partielle au *S. aspera* et *S. hermonthica* (Riches *et al.* 1996; Johnson *et al,* 2000).

S'agissant du niébé, la variété locale "B 301" du Botswana; la 'IT82D-849' lignée améliorée de l'IITA); la 'Gorom Local' du Burkina Faso; et la '58-57' du Sénégal ont été trouvées complètement résistantes avec quelques variations à différentes souches de *S. gesnerioides* (Singh et Emechebe 1990). Par le croisement, un certain nombre de variétés ont été créées avec résistance combinée à toutes les cinq souches de *S. gesnerioides* (Singh, 2000). Certaines de ces lignées ont également montré une résistance à *Alectra vogelii*, au flétrissement bactérien, aux aphides, aux bruches, aux thrips, aux maladies virales avec un potentiel de rendement supérieur à 2 tonnes ha^{-1}.

Orobanche: Des variétés résistantes/tolérantes à *Orobanche* ont été créées dans plusieurs cultures et utilisées pendant quelques années. L'exemple le plus frappant a été la création de variétés de tournesol résistantes à *O. cernua/cumana*. Malheureusement, cette résistance a été souvent surmontée par de nouvelles races de parasites plus virulentes dans plusieurs pays de la Région Méditerranéenne, de l'Europe de l'Est et de l'ex Union Soviétique. Récemment, le tournesol (KI-374) a été rapporté comme résistant a la race très virulent "population F" de *O. cumana* (Rodrigue-Ojeda *et al* 2001). Deux cultivars de *V. faba* (Giza 429 et Giza 674) avec un bon niveau de résistance à *O. crenata* avaient été vulgarisés en Moyenne et Haute Egypte (Khalil *et al.* 1993). De plus, un nouveau génotype de *V. faba* (X-843) issu de Giza 402, résistant à *O. crenata*, a été rapporté comme ayant une bonne performance et a été recommandé pour être vulgarisé au nord de l'Egypte (Saber *et al.* 1999). Un cultivar de *V. faba* 'Baraca' à haut rendement et bien adapté a été créé en conditions de champ en Espagne, avec un haut niveau de résistance à *O. crenata* (Cubero 1994). Jusqu'ici, les semences des variétés développées et recommandées de haricot faba ne sont pas commercialisées et ne sont donc pas disponibles pour les producteurs. Alonso (1998) a intensément revu les résultats les plus prometteurs obtenus dans la sélection pour la résistance aux autres espèces de *Orobanche*. Cependant, la plupart des autres rapports sur les autres cultures font référence à la tolérance et à un niveau modéré de résistance, et n'étaient pas capables de déceler un haut niveau de résistance fiable. Ce fût le cas de relations hôtes-parasites suivantes: *O. aegyptiaca* et *O. ramosa* (tomate), *O. ramosa* (chanvre), *O. crenata* (lentilles, pois chiche et pois), *O. aegyptiaca* (cucurbitacées), *O. aegyptiaca*, *O. ramosa* et *O. cernua* (tabac). Dans certains cas, une résistance complète en conditions de champ de quelques lignées de vesce (473A) (Gil *et*

al. 1987; Goldwasser *et al.* 1997), et des lignées de tomates (PZU-11) (Foy *et al.* 1988) ont été confirmées. Néanmoins, en conditions d'inoculation artificielle avec une très grande dose de *Orobanche*, même les lignées résistantes au champ furent attaquées.

Plus récemment, Sauerborn *et al.* (2002) ont induit la résistance dans le tournesol contre *O. cumana* en utilisant le produit chimique synthétique benzo (1, 2, 3) thiadiazole-7-carbothioic acide S-methyl ester (BTH), la matière active de Bion®, en condition de croissance contrôlée. Cependant, l'application de BTH n'a pu induire la résistance contre le *Striga* dans le sorgho et le maïs (Zain, 2002).

Progrès dans le contrôle biologique: mise en œuvre et perspectives futures

La lutte biologique des mauvaises herbes avec les insectes et les agents microbiens, veut dire l'utilisation des organismes vivants pour manipuler (supprimer, réduire, ou éradiquer) les densités des mauvaises herbes. Le contrôle biologique utilisant spécialement les insectes et les champignons contre les mauvaises herbes parasites a gagné une attention considérable dans les années récentes et paraît être prometteur comme complément viable d'autres méthodes de contrôle.

Insectes

De nombreux insectes phytophages ont été collectés sur les espèces de *Striga* et de *Orobanche*, mais la plupart d'entre eux sont des polyphages et les espèces de mauvaises herbes cibles ne sont pas leurs principales plantes hôtes. Les herbivores oligophages et monophages avec un potentiel de bio-contrôle de *Striga* spp. sont les larves de papillons *Eulocastra argentisparsa* Hampson (Lepidoptera: Noctuiidae) en Inde; *Smicronyx* spp. (Coleoptère: Curculionidae) en Inde et en Afrique; le foreur de tige *Ophiomyia strigalis* Spencer (Diptère: Agromyzidae) en Afrique de l'Est (Kroschel *et al.* 1999; Traoré *et al.* 1999). La mouche *Phytomyza orobanchia* Kalt. (Diptère: Agromyzidae) et *Smicronyx cyaneus* Gyll. sont d'un grand intérêt en bio-contrôle de *Orobanche* spp. (Klein et Kroschel, 2002). Comme seule méthode, le contrôle biologique avec les herbivores sera à peine entièrement suffisant pour s'attaquer au problème des mauvaises herbes parasites. Mais, en combinaison avec d'autres méthodes dans un paquet de lutte intégrée, les herbivores pourraient jouer un rôle dans la réduction de la population des mauvaises herbes parasites et de leur capacité de reproduction et d'expansion. La plus prometteuse est le lâcher en masse de *P. orobanchia*. Cependant, le contrôle biologique classique aussi pourrait être une option par l'introduction de *P. orobanchia* dans les pays où *Orobanche* spp. ne sont pas endémiques et ont été involontairement introduits, tel que Chili (Norambuena *et al.* 1999, 2001; Klein et Kroschel, 2002).

Les agents microbiens

Les pathogènes des plantes sont proposés pour être utilisés, dans une approche autre que l'approche classique inondative, comme 'bio herbicides' pour le contrôle biologique des mauvaises herbes parasites. Le protocole pour leur application implique: l'enquête sur les mauvaises herbes pour identifier les pathogènes, l'isolement, l'identification et la classification, la production d'inoculum, le criblage pour l'efficacité (test de pathogénécité), la spécifié de l'hôte et la sécurité du test, la production en masse de l'inoculum, le test préliminaire en champ, la formulation et la mise à disposition pour une adventice cible. Donc, un type de champignon et très peu d'agents bactériens appliqués aux semences, feuilles et/ou sol ont été explorés comme candidats potentiels pour les mauvaises herbes parasites des genres *Striga* et *Orobanche* depuis le début des années 90 (bien passé en revue dans Kroschel et Müller-Stöver, 2003).

Les isolats fongiques prometteurs actuellement sous investigation pour le bio-contrôle de *Orobanche* et *Striga* ont montré des gammes d'hôtes différentes (Table 1). FOO exclusivement attaque *O. cumana*, le plus proche parent de *O. cernua* et quelques biotypes sensibles de *O. aegyptiaca* (Bedi 1994; Thomas *et al.* 1998). Müller-Stöver, (2001) a observé une réduction du taux de germination des semences de *O. crenata* par action de FOO, bien qu'aucune pathogénicité n'a été observée au cours des stades de développement ultérieurs des mauvaises herbes parasites. FOXY et FARTH, isolés en Israël attaquent *O. aegyptiaca, O. cernua* et *O. ramosa*, mais ils ne sont pas virulents contre *O. cumana* (Amsellem *et al.* 2001). Des observations récentes ont montré que Foxy 2 a significativement réduit l'émergence de *S. hermonthica* et *S. asiatica*, tandis que les symptômes de maladie pourraient être observés seulement sur *S. hermonthica* (Elzein et Kroschel, 2003). Cet avantage et l'aptitude des isolats fongiques potentiels à contrôler plus d'une espèce de *Orobanche* ou de *Striga* fournissent une opportunité de contrôler simultanément plus de parasites dans ces régions où elles cohabitent, ce qui peut encourager les autorités de régulation à accepter et mettre en œuvre i la lutte biologique contre les mauvaises herbes parasites.

Le type de formulation utilisé pour un bio herbicide dépend de la biologie de l'adventice cible, du type, de la biologie et du mode d'action du pathogène, de même que du mode d'application disponible. Pour les pathogènes fongiques, la méthode la plus simple est l'utilisation de suspension de spores ou de mycéliums dans de l'eau, qui peut être utilisée pour tremper le sol ou comme traitement post levée. Pour les mauvaises herbes parasites, cette formulation fût utilisée dans les premières étapes d'évaluation de l'efficacité des champignons antagonistes potentiels dans les serres ou en champs. Les formulations solides ou granulées sont plus indiquées pour les pathogènes qui infectent leurs mauvaises herbes cibles à la surface ou au-dessous du sol (c'est à dire en attaquant les plantules des mauvaises herbes dès qu'elles émergent du sol), un système plus approprié pour les parasites des racines et plus indiqué pour les traitements pré-levée. Par conséquent, plusieurs substrats ont été souvent utilisés comme supports pour l'utilisation des mycoherbicides des mauvaises herbes parasites. Ils comprennent les graines ou pailles infectées des céréales (orge, blé, sorgho), sol/mélanges d'aliments à base de maïs, mélange de paille et de farine de maïs, sable de rivière et préparations de maïs. Bien que ces simples formulations granulés (solides) se révélèrent très efficaces dans les serres et en champs aussi bien pour le contrôle des parasites que pour l'amélioration de la performance des plantes hôtes, on a constaté qu'un très haut niveau d'inoculum fongique (approximativement 800 kg ha^{-1}) était nécessaire pour réussir le contrôle du parasite. En plus, plusieurs caractéristiques non désirables sont rencontrées avec l'utilisation des grains de céréales et de la paille comme substrats pour la livraison des champignons pathogènes pour le contrôle des mauvaises herbes parasites, spécialement pour une forte infestation à grande échelle comprenant:

- difficultés de préparation et d'application de grands volumes;
- durée de conservation inadéquate;
- difficultés de contrôle de la production de propagules fongiques (désirées) appropriées;
- coût élevé;
- pas convenable pour l'usage commercial.

Il est évident que des efforts de recherche pour développer un mycoherbicide d'une formulation appropriée de champignons antagonistes pour le contrôle de *Orobanche* et *Striga* sont justifiés et nécessaires pour faciliter l'application au champ.

Mycoherbicides: Défis et limitations de succès

Un certain nombre de limitations biologiques, environnementales et technologiques, la variabilité de la performance en champ, le coût de production et la taille du marché sont les contraintes majeures qui affectent potentiellement la faisabilité économique de n'importe quel produit de contrôle biologique donné (Auld et Morin, 1995). A ce jour, un grand nombre d'agents microbiens de contrôle biologique ont été ou sont en cours d'évaluation pour leur pathogénicité contre les mauvaises herbes parasites. En dépit du grand nombre d'organismes passé en revue, seulement deux isolats pour le contrôle du *Striga*, et trois pour *Orobanche* sont considérés comme des candidats potentiels (Tableau 1); mais, ils n'ont pas encore atteint l'application à grande échelle en champ. Cependant, on devrait avoir à l'esprit que la découverte d'un pathogène n'est qu'une étape du long processus de développement d'un bio-herbicide. Le produit de bio-contrôle est prêt seulement lorsque tous les processus dans la production et la formulation, la livraison, l'information sur la pathogénicité, le mode d'action et la spécificité de l'hôte ont été évalués. Il y a beaucoup d'obstacles inhérents à surmonter en vu d'asseoir l'efficacité du bio-contrôle. Ils comprennent des aspects fondamentaux relatifs à la sélection de la souche, une production efficiente de biomasse, la formulation, la facilité de conservation, et la méthode d'application. Aussi, une meilleure compréhension des mécanismes d'action, la nutrition et l'écologie de l'agent de bio-contrôle est nécessaire. En plus, il faut s'assurer qu'on peut éviter les effets adverses non souhaités sur les espèces cultivées et sauvages non cibles, apparentées à l'espèce cible, ou poussant dans le rayon de dissémination de ce pathogène, le soit disant spécificité de l'hôte a besoin d'être confirmée. Plus loin, le potentiel pour la manipulation génétique des agents microbiens pour créer des souches supérieures ou des hybrides qui peuvent être plus performants que les types sauvages doit être considéré. Le progrès dans le contrôle biologique des plantes parasites par les microorganismes doit être discuté en ayant en esprit de surmonter les obstacles ci-dessus mentionnés.

APPROCHES REUSSIES POUR SURMONTER LES LIMITATIONS AU BIO-CONTROLE: UNE ETAPE VERS L'APPLICATION PRATIQUE

Elevage de masse et lâchers d'insectes: le cas de *Phytomyza orobanchia*

La biologie et l'efficacité naturelle

P. orobanchia (Diptera, Agromyzidae) a co-évolué avec les espèces d'*Orobanche*. Ainsi, sa distribution est relative à la présence naturelle de plantes du genre *Orobanche*. Les dommages sur *Orobanche* sont causés par les larves qui minent les tiges et les capsules de semences. De cette façon *P. orobanchia* a un impact énorme sur la production de semences de *Orobanche* spp. En fonction du site, de la plante hôte et des espèces de *Orobanche*, jusqu'à 95 % des capsules de semences peuvent être infestés par *P. orobanchia*. Une réduction naturelle de la production de semences entre 11-79 % est rapportée dans plusieurs pays de la région Méditerranéenne, de l'Afrique du Nord et de l'Est, et du Proche orient (Klein et Kroschel, 2002). Cependant, l'efficacité de *P. orobanchia* pour réduire la population de *Orobanche* est principalement limitée par les pratiques culturales (en détruisant les pupes dans le sol par les méthodes de culture du sol ou en utilisant des insecticides) et la présence d'ennemis naturels. Les parasitoides larvaires et pupales de l'ordre des Hyménoptères, avec 24 espèces identifiées à travers le monde, appartenant à sept familles sont les plus importants (Klein et Kroschel, 2002). La population naturelle de *P. orobanchia* est trop basse pour pouvoir réduire suffisamment la population de *Orobanche* au point que des pertes économiques ne surviennent pas. L'équilibre naturel entre *Orobanche* et *P. orobanchia* tel qu'il existe dans la végétation naturelle est perturbé par le vaste culte des plantes hôtes de *Orobanche*. Donc, une

augmentation dans l'efficacité de *P. orobanchia* peut être atteinte seulement par une augmentation de la population naturelle.

Efficacité de la méthode 'inondative'

Le bio-contrôle de *Orobanche* spp. par *P. orobanchia* est basé sur la condition préalable que les tiges de *Orobanche* soient chargées avec les pupes de *P. orobanchia* au temps de la moisson de la plante hôte de *Orobanche* et qu'aucune méthode d'élevage basée sur les régimes artificiels n'ait été développée avec succès. Ceci signifie que les tiges de *Orobanche* doivent être ramassées et emmagasinées jusqu'à la saison prochaine. En procédant ainsi, la destruction mécanique des pupes par le labourage ou les autres opérations peut être évitée. Le stockage peut être fait de préférence dans un soit disant "Phytomyzarium", qui offre des avantages spéciaux pour la collection et le lâcher d'adultes éclos (Klein et Kroschel, 2002; Kroschel et Klein, 2003). Cependant, le taux d'éclosion des adultes des pupes collectées et stockées est seulement de 4 %, à cause de la haute proportion des pupes en diapause, qui peut durer trois années. Le cas échéant, le stockage sous des conditions plus froides dans le réfrigérateur pour une certaine période de temps peut augmenter le taux d'éclosion à 10 %.

En calculant le nombre de mouches à être lâchées dans le champ, le niveau d'infestation de *Orobanche* prévu, de même que la capacité reproductive de la mouche doivent être pris en considération. L'efficacité des lâchers inondatifs de *P. orobanchia* pour réduire la production de semences de *O. cernua* ou *O. aegyptiaca* parasitant le tournesol et les autres cultures a été déjà démontrée dans les années 60s et 70s dans les différentes régions de l'ex Union Soviétique. Des lâchers de 500–1 000 adultes par ha ont entraîné une réduction allant jusqu'à 96 % de la production de semences de *Orobanche* (Natalenko, 1969; Bronstejn, 1971; Kapralov, 1974). Au Maroc, les lâchers inondatifs ont significativement réduit la reproduction de *O. crenata* dans *V. faba*. Au cours des 3 années de recherche, seulement 3.7 à 6.2% des semences étaient viables après les lâchers, en comparaison avec 94.9 % (1996), 57.1 % (1997) et 36.5 % (1998) des contrôles sans lâcher (Kroschel et Klein, 2003).

Les lâchers inondatifs exigent une méthode d'élevage en masse efficace ou dans le cas de *P. orobanchia* une provision suffisante de mouches recueillies des tiges de *Orobanche*. Au Maroc, le nombre de mouches écloses à partir des tiges de Phytomyzarium avec un taux d'éclosion de seulement 4 % sera toujours suffisant même pour le traitement de champs extrêmement infestés. Cependant, des méthodes plus efficaces devraient être développées pour manipuler la diapause et l'éclosion d'adultes, qui rendraient la collecte et le stockage plus efficaces et plus pratiques.

Prenant en considération l'énorme banque de semences et la longévité des semences de *Orobanche*, les lâchers inondatifs de *P. orobanchia* ne seront pas suffisants comme unique méthode de contrôle dans les champs fortement infestés. Au contraire, dans les champs faiblement infestés il pourrait empêcher une dissémination ultérieure. Cependant, spécialement pour le contrôle de plantes parasites, un système efficace et durable de gestion des mauvaises herbes doit être basé sur une combinaison de différentes techniques. Le contrôle biologique avec *P. orobanchia* pourrait être une partie importante dans un système intégré de gestion de *Orobanche* et, pour cela faire partie des Champ Ecoles Paysans, par exemple la combinaison de l'arrachage manuel des tiges de *Orobanche* avant la maturation des semences et le stockage des tiges collectées pour élever *P. orobanchia* pourrait être très efficace. De plus, le bio-agent pourrait limiter la production de semences des tiges de *Orobanche* qui échappent et se développent quand des variétés résistantes sont utilisées et peuvent empêcher le développement de races de *Orobanche* plus agressives.

La formulation et la livraison de mycoherbicides: le cas des isolats de *Fusarium*

Evaluation du risque: Pathogénicité envers des plantes non-ciblées

L'acceptation et l'application du contrôle biologique inondatif par les autorités régulatrices sont basées sur les questions de sécurité, qui comprennent l'action d'éviter les effets négatifs associés à l'utilisation d'agents de contrôle biologiques, que l'agent soit indigène ou non-indigène, apparaissant naturellement ou par modification génétique. Donc, il est très important que les méthodes de test de spécificité de l'hôte et l'évaluation du risque conduisent tous les deux à prévenir le lâcher de n'importe quel organisme qui peut avoir des impacts négatifs sur des plantes non-cibles et/ou sur l'environnement. Dans des études récentes, l'effet de *F. oxysporum* Foxy 2 sur 25 espèces de plantes non-cibles a été examiné en serre (Elzein et Kroschel, 2003). Le choix des plantes a été basé sur la parenté de l'espèce à *S. hermonthica* et de la plante hôte le sorgho (Wapshere, 1974). Les plantes cultivées économiquement importantes, de même que les espèces de plantes rapportées pouvant être extrêmement susceptibles à *F. oxysporum,* une maladie des tropiques et des subtropiques ont été aussi considérées. Aucune des espèces de plantes testées n'a montré de signe d'infection quand elles ont été inoculées avec Foxy 2. Cette spécificité d'hôte a été aussi confirmée par les autres études d'autres catégories d'hôtes parmi lesquels les isolats de *F. oxysporum* indigènes du Burkina Faso, Mali et Niger qui n'infectent que le *Striga* spp. et aucune des cultures (dont les maraîchères) testées (Abbasher *et al.* 1998; Ciotola e*t al.* 1995). Aussi, les souches de *Fusarium* pathogènes de *Orobanche* n'ont attaqué aucune des diverses plantes testées (Bedi, 1994; Amsellem *et al.* 2001; le Müller-Stöver, données non publiées).

La production de phytotoxines

Beaucoup d'espèces de *Fusarium* produisent une gamme de composés phytotoxiques, tel que fumonisin, enniatin, moniliformin, zerealenone, dérivés de trichotecene, l'acide fusarique et d'autres (Nelson *Et al.* 1994). Certains de ces composés ont un effet toxique marqué sur l'homme, les animaux et les plantes et sont probablement cancérigènes (par exemple moniliformin et le fumonisin B_1) (Nelson *et al.* 1993). A cause des inquiétudes liées à la santé et des risques potentiels associé à la contamination par les mycotoxines, l'usage de candidats aux bioherbicides qui produisent des mycotoxines cancérigènes ne peut pas être recommandé. Par exemple, l'usage de *F. nygamai,* un candidat potentiel pour le contrôle de *S. hermonthica* (Abbasher et Suerborn, 1992) a été rejeté à cause de la production de fumonisin B_1 (Zonno *et al.* 1996). Heureusement, l'acide fusarique, l'acide 10-11-deshydrofusarique et leurs esters de méthyle, qui ne présentent pas des risques de santé, étaient les seuls métabolites produits par les isolats potentiels de *F. oxysporum* dans l'investigation actuelle pour le contrôle biologique de *Striga* et de *Orobanche* (Savard *et al.* 1997; Thomas, 1998; Amalfitano *et al.* 2002) faisant de ces isolats des candidats très intéressants pour le contrôle biologique des mauvaises herbes parasites.

Production en masse d'inoculum

Une fois qu'un agent microbien a montré un potentiel pour le contrôle de mauvaises herbes parasites en laboratoire, serre, et tests en champs, la production en masse de propagules infestantes viables et génétiquement stables, devient un handicap majeur, pour le développement d'un bio-herbicide. Pour la recherche en laboratoire et en serre et même les essais à petite échelle en champ, la production d'une quantité suffisante d'inoculums fongiques peut être souvent facilement réalisée. Cependant, les méthodes et les techniques de production en masse doivent être développées pour l'utilisation pratique à grande échelle. Quelques isolats fongiques de bio-contrôle sont mieux performants si leur inoculum contient des chlamydospores, tandis que d'autres causent un effet pathogénique avec les conidies et/ou les mycelia. Destiné au développement de méthodes et techniques de production en masse

économiquement faisables, les investigations récentes ont souligné l'utilisation de sous-produits agricoles comme substrats, y compris la paille de sorgho, la paille de maïs, les tourteaux de graines de coton et d'ensilage à base de blé, pour produire en masse des isolats de *F. oxysporum* pour le *Striga* et *Orobanche*. Ces substrats sont facilement disponibles, bon marché et ne nécessitent aucun traitement ultérieur avant leur usage. En utilisant la paille de sorgho (Ciotola *et al.* 2000), un mélange de paille de sorgho et ensilage de blé (le Müller-Stöver, 2001) et la paille de maïs, plus l'ensilage de blé (Elzein, 2003), d'abondants chlamydospores de trois isolats de *F. oxysporum* (M12-4A, FOO et Foxy 2, respectivement) ont été produits dans les systèmes de fermentation liquide. D'autre part, la production en masse d'autres propagules, par exemple des conidies et des mycelia et de tous antagonistes fongiques prometteurs de *Striga* ou *Orobanche,* est facilement atteinte par l'utilisation de milieu de culture artificiel tel que le bouillon de dextrose de pomme de terre, agar-agar extrait de malt ou les sous-produits agricoles (Abbasher, 1994; Bedi, 1994; Ciotola *et al.* 1995; Kroschel *et al.* 1996a; Thomas, 1998, Amsellem e*t al.* 2001, le Müller-Stöver, 2001; Elzein, 2003).

Formulation et livraison de mycoherbicides

Des systèmes de formulation et de livraison adéquats sont les principaux éléments dans la performance des mycoherbicides. Un nombre de défis sont rencontrés dans la formulation de bioherbicides, y compris la facilité de production et d'application, de même que la garantie de viabilité des propagules et l'efficacité à long terme, puisque les produits doivent être conservés pour de longues périodes de temps, souvent dans des structures avec des conditions environnementales variables (Lumsden *et al.* 1995). Donc, une sélection de formulations appropriées qui peuvent renforcer l'efficacité et la vitesse de contrôle de mauvaises herbes en surmontant les contraintes écologiques, réduction de la concentration d'agents biologiques requise pour l'utilisation finale, l'augmentation de la durée de stockage et/ou interférence avec les mécanismes de défense de la mauvaise herbe cible peuvent réduire l'inconsistance de la performance au champ de beaucoup d'agents de contrôle biologiques potentiels (Connick e*t al.* 1991; Boyette e*t al.* 1996; Auld et Morin, 1995). La formulation implique la préparation de l'ingrédient actif, c'est à dire les propagules de l'agent microbien, un support, et souvent d'autres adjuvants pour fournir un produit viable et efficace qui peut être appliqué à la mauvaise herbe cible.

Plusieurs techniques ont été développées pour encapsuler les propagules fongiques dans une matrice solide qui peut servir à stabiliser l'organisme vis à vis des contraintes écologiques comme la dessiccation rapide ou la compétition microbienne (Walker et Connick, 1983; Connick e*t al.* 1991). Quelques efforts et des progrès ont été faits pour appliquer aux agents pathogènes de bio-contrôle des plantes parasites, des méthodes d'encapsulation simples convenables pour les applications de pré-semis au sol. Amsellem *et al.* (1999) ont utilisé avec succès la méthode 'Stabileze de formulation ' de Quimby *et al.* (1999), une formulation d'amidon absorbant, huile de maïs, sucre et silice, pour formuler des conidies et des mycelia de FOXY et FARTH pour contrôler *O. aegyptiaca* cultivé dans des sacs de polyéthylène. Un autre exemple réussi de formulation de granules appelée 'Pesta', contenant des propagules de Foxy 2 et FOO a été préparée, et s'est montrée hautement efficace dans le contrôle de *S. hermonthica* et *O. cumana* en serre (Kroschel *et al.* 2000, le Müller-Stöver, 2001; Elzein, 2003) (la fig. 1). La méthode consiste en un mélange fermenté de biomasse fongique (humide ou sec) dans une matrice composée de denrées agricoles (semoule, kaolin, et sucrose) utilisant un procédé d'extrusion (pour plus de détails voir Müller-Stöver 2001; Elzein 2003). Avec une application de 0.5 g de granules formulées de 'Pesta' par kg de sol, les auteurs ont atteint la même efficacité dans le contrôle du *Striga* et *Orobanche*, comme avec l'usage de 10 g d'inoculum appliqué sur les grains de blé (tableaux 2a, 2b, fig. 2). Une telle réduction (95 %) dans la quantité d'inoculum fongique par suite d'adoption de la technologie de formulation pourrait être économiquement très significative si l'application à grand échelle est prise en

compte. L'utilisation de 0.5 g de granules par kg de sol, approximativement 300 kg de 'Pesta' granules, à un coût approximatif de 86 $ US (les ingrédients seulement), est nécessaire pour le contrôle d'un ha infesté avec *O. cumana* ou *S. hermonthica*. Néanmoins, et d'un point de vue pratique, une possibilité pour réduire la dose peut être le positionnement approprié du produit formulé sur la mauvaise herbe cible, par exemple dans le poquet de semis, application dans le sillon ou l'enrobage des semences de sorgho avec l'antagoniste avant la livraison. Par exemple, si 0.5–1g de 'Pesta' granules est appliqué par poquet de semis, seulement 14–28 kg (4–8 $ US) de granules seront nécessaires pour le contrôle d'un ha infesté avec *Orobanche* ou *Striga*.

Tableau 1: Isolat de *Fusarium* actuellement sous investigation pour le bio-contrôle de *Striga* et *Orobanche* spp

Champignon	Abréviation	Mauvaise herbe cible	Auteur
F. oxysporum	Isolat M12-4A	*S. hermonthica*	Ciotola *et al.* (1995)
F. oxysporum	Foxy 2	*S. hermonthica*, *S. asiatica*	Kroschel *et al.* (1996b), Elzein and Kroschel (2000)
F. oxysporum f.sp. *orthoceras*	FOO	*O. cumana*, *O. cernua*, *O. aegyptiaca*	Bedi et Donchev (1991)
F. oxysporum	FOXY	*O. aegyptiaca*, *O. ramosa*, *O. cernua*	Amsellem *et al.* (2001)
F. arthrosporioides	FARTH	*O. aegyptiaca*, *O. ramosa*, *O. cernua*	Amsellem *et al.* (2001)

Tableau 2a: L'efficacité de 'Pesta' formulation contenant une biomasse riche en chlamydospores de *F. oxysporum* 'Foxy 2' en comparaison à un inoculum de grains de blé dans le contrôle de *Striga hermonthica* et l'amélioration de la performance du sorgho

Traitement[1]	Dose, g kg^{-1} sol	*Tiges de Striga*		Sorgho		Efficacité[2], %
		No émergés. Pot^{-1}	Matière sèche, en g	Matière sèche tige, en g	Rendt en panicules, g	
Granules de Pesta	0.5	3.7 (2.0)b	3.4 (2.1)b	72 (12)b	18.4 (1.9)a	**89**
Grains de blé	10	6.3 (2.5)b	2.1 (0.5)b	97 (2.6)a	3.6 (2,3)b	**82**
Contrôle (C-)	-	33 (4.1)a	14.7 (0.3)a	34 (6.1)c	0 c	
Contrôle (C+)	-	-	-	59.5 (2.9)bc	14.7 (2.6)a	

Source, Elzein, (2003)

Tableau 2b: L'efficacité de 'Pesta' formulation contenant une biomasse riche en chlamydospores de *F. oxysporum* f.sp. *orthoceras* "FOO" en comparaison à un inoculum de grains de blé dans le contrôle de *Orobanche cumana* et l'amélioration de la performance du tournesol.

Traitement	Dose g kg^{-1} de sol	Tiges de *Orobanche*		Matière sèche de tournesol, en g	Efficaité[1], %
		No. émergés Pot^{-1}	Matière sèche, en g		
Granules de Pesta	0.5	34(9)	3.3(0.89)	9.1(1.1)	**78**
Grains de blé	10	31(11)	2.9(1.2)	13.9(1.1)	**89**
Control (C-)	-	78(11)	7.9(1)	9.7(0.6)	
Control (C+)	-	-		21.6(1.1)	

[1]Control (-) = hôte (sorgho ou tournesol) plus parasite; Control (C+) = sorgho seulement. [2]Efficacité a été calculée comme le pourcentage de réduction des parasites sains émergés (*Striga*, ou *Orobanche*) comparé au contrôle négatif (C-). Source, Müller-Stöver (2001).



Fig. 1: Formulation granulaire de 'Pesta' faite avec différentes propagules de *Fusarium oxysporum* 'Foxy 2' : Microconidies (en haut, à gauche); Mycelia + Microconidies (en haut, à droite); biomasse fraîche riche en chlamydospores (en bas, à droite), et biomasse séchée riche en chlamydospores (en bas, à gauche).

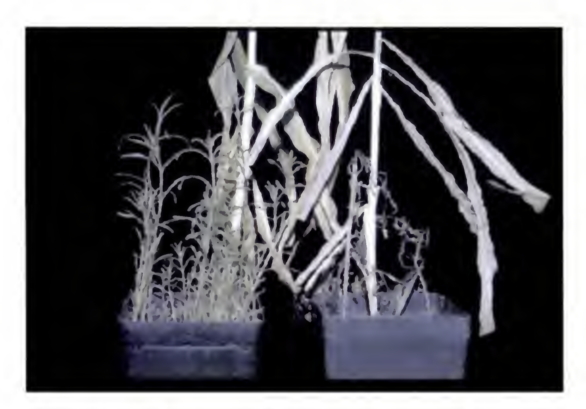


Fig. 2: Symptômes de maladie sur tiges de *S. hermonthica* causés par *Fusarium oxysporum* 'Foxy 2' (à droite), le contrôle (à gauche)

Le type d'inoculum utilisé dans les formulations a fortement influencé leur durée de conservation. Amsellem *et al.* (1999) ont découvert que les formulations de mycelia coupés étaient mieux conservées que les conidies et, Elzein *et al.* (2000) de même que Müller-Stöver (2001) ont rapporté qu'une formulation avec une biomasse riche en chlamydospores avait une durée de vie plus longue que les microconidies des agents de bio-contrôle. Jusqu'à 100 % de viabilité de propagules fongiques, avec les granules de 'Pesta', pour au moins une année de vie, a été atteinte avec des formulations en incorporant des biomasses riches en chlamydospores et emmagasinés à une température basse (4° C), qui pourrait être suffisante pour la commercialisation.

Les niveaux prometteurs de contrôle de *Orobanche* et *Striga* obtenus avec les granules de 'Pesta' contenant des propagules de FOO et Foxy 2 justifient un développement ultérieur des granules de 'Pesta' pour les tests en champ. La production à l'échelle commerciale est possible avec l'utilisation de extrusion à deux hélices (Daigle *et al.* 1997). Les granules de 'Pesta' à base de farine de blé-kaolin peuvent être modifiés facilement pour s'accommoder des ingrédients indigènes des ressources agricoles des pays sub-sahariens tels que les autres farines de grains de céréales qui peuvent donner un produit plus efficace et plus économique. La préparation de 'Pesta' sous forme de granules à flux libre a plusieurs avantages: il est non-toxique; d'un rapport coût-efficacité relativement satisfaisant; peut être produit à grande échelle; commode pour le stockage; d'utilisation simple; peut être appliquée en utilisant la machinerie agricole; et peut être intégré facilement avec les méthodes de contrôle de *Striga* et *Orobanche* existantes, par exemple les méthodes culturales et mécaniques, et l'utilisation de variétés résistantes.

Une autre approche attrayante pour livrer les agents de bio-contrôle directement dans la rhizosphère des plantes hôtes est l'utilisation de semences enrobées. Le traitement des semences avec un assortiment des micro-organismes antagonistes a été utilisé avec succès pour contrôler quelques maladies des semences et des sols. En enrobant les semences des plantes hôtes de *Striga* et *Orobanche* avec des champignons antagonistes les pathogènes fongiques pourraient être introduits dans les sites d'infection des parasites. La faible survie des antagonistes pendant le processus de traitement des semences et le stockage subséquent,

de même que l'incapacité à coloniser la rhizosphère tôt au cours du développement de la plantule ont été décrits comme les principales raisons de la faible performance quand l'antagoniste est appliqué comme traitement de semences (Berger et *al.* 1996). Les semences de Sorgho enrobées avec l'inoculum de *F. oxysporum* M12-4A séché à l'air a complètement empêché l'émergence de *S. hermonthica* dans une expérience en pots (Ciotola et *al.* 2000). Dans des études récentes, Foxy 2 a survécu au processus de traitement de semences et a montré une excellente viabilité sur les semences pour au moins une année de stockage (Elzein et *al.* 2003). Le champignon était aussi capable de coloniser rapidement le système racinaire du sorgho, et a montré une efficacité prometteuse (75–100 %) dans le contrôle du *Striga* dans les essais en pots et en chambre à racines. Donc, les isolats de *F.* oxysporum (M12-4A, Foxy 2) satisfont aux critères d'un candidat prometteur pour le contrôle de *Striga* quand ils sont appliqués en traitement de semences. Cependant, des problèmes peuvent survenir avec les fongicides incompatibles ou les autres agents de bio-contrôle qui sont projetés pour être appliqués comme enrobeurs de semences aussi (Amsellem et *al.* 2001). Le coût de semences de sorgho pré-enrobées suffisantes pour ensemencer 1 ha est seulement 21 $ US, ce qui inclut aussi bien le coût du matériel d'enrobage que le coût de fabrication industrielle (coût de production) (Elzein, 2003). D'autres coûts ne sont pas envisagés puisque les semences pré-enrobées, sont plus appropriées pour être semées avec l'utilisation de la machinerie agricole existante et sont aussi compatibles avec les pratiques agricoles adaptées. En utilisant les matériels d'enrobage que l'on trouve naturellement (par exemple la gomme arabique) dans les zones sahéliennes et sub-sahariennes d'Afrique, une réduction accrue des coûts du traitement de semences est possible. Si ces résultats devaient être confirmés en conditions de champ, le traitement de semences pourrait contribuer à une application plus significative des isolats de *F.* oxysporum (M12-4A, Foxy 2) comme un antagoniste du *Striga* dans une approche de contrôle intégrée.

Métabolites phytotoxiques d'origine microbienne

En tenant compte de la sensibilisation croissante à la résistance des herbicides, de nouveaux composés d'origine microbienne peuvent fournir de nouveaux procédés chimiques pour de mauvaises herbes qui peuvent être difficile à contrôler autrement, par exemple les plantes parasites. Les composés dérivés microbiens peuvent être recherchés comme moules pour la synthèse de nouveaux herbicides chimiques synthétiques ou comme pathogènes appliqués directement sur la mauvaise herbe cible (Boyetchko 1999). Les toxines produites par *Fusarium* spp. sont aussi phytotoxiques à plusieurs plantes (Duke, 1986) et donc, leurs effets de bio-herbicides ont été essayés contre diverses mauvaises herbes et cultures (Hoagland, 1990; Abbas et Boyette, 1992). Ceci a donné un élan pour examiner si les isolats potentiel de *Fusarium* de *Striga* et *Orobanche* peuvent produire des métabolites phytotoxiques qui ont des effets bio-herbicides sur les différents stades de développement des plantes parasites, et évaluer si ces composés jouent un rôle significatif dans l'effet antagonistes des isolats. La plupart des isolats de *Fusarium* prometteurs de *Striga* et *Orobanche* examinés étaient en mesure de produire de petites quantités d'acide fusarique, d'acide 10-11-dehydrofusarique et leur esters de méthyle. L'effet toxique de ces métabolites sur les semences de *Striga* a été précédemment prouvé par Zonno et *al.* (1996). Les investigations ultérieures ont montré que fumonisin B_1, qui est produit par les isolats de *F. nygamai* de *S. hermonthica*, a un effet herbicide sur *Striga* spp., surtout quand il est appliqué en post-levée. Ceci pourrait indiquer le rôle de fumonisine B_1 ou dans le processus d'infection ou au cours du développement de la maladie quand le champignon est appliqué pour contrôler le *Striga* (Kroschel et Elzein, 2003).

Manipulation génétique d'agents de bio-contrôle

Tous les exemples d'agents microbiens pour les plantes parasites portent sur les antagonistes indigènes, survenant naturellement, qui continueront à être une source majeure pour le criblage de nouveaux isolats (souches) plus efficaces à l'avenir. Cependant, les approches

moléculaires et l'ingénierie génétique pour développer un agent de bio-contrôle des mauvaises herbes avec une bio-activité renforcée ont été examinées (Sands *et al.* 2001). Les agents de bio-contrôle transgéniques (Gressel, 2001; Sharon *et al.* 200 1) ou des plantes transgéniques contenant des gènes pathogènes codant des enzymes et des toxines pour produire la résistance aux ravageurs (Harman et Donzelli, 2001), sont d'autres façons qui été utilisées pour renforcer davantage la virulence, la survie et l'efficacité des agents de contrôle biologique des mauvaises herbes et d'autres organismes nuisibles, qui sont aussi des options qui paraissent appropriées pour les plantes parasites. La virulence des agents de bio-contrôle peut être généralement renforcée par la transgenèse, en utilisant des gènes exogènes en combinaison avec des dispositifs de sécurité pour empêcher leur diffusion et introgression dans les pathogènes des cultures. Par exemple, les deux champignons pathogènes *F. oxysporum* (FOXY) et *F. arthrosporioides* (FARTH) de *O. aegyptiaca* génétiquement modifiés avec deux gènes de synthèse de acétamide indole-3 (IAM), étaient plus efficaces pour éliminer le nombre et la taille des tiges d'*Orobanche* que le pathogène naturel sur les plantes de tomate (Amsellem *et al.* 2001; Gressel, 2001). Cependant, la création de mycoherbicides génétiquement manipulés doit reposer sur une connaissance approfondie de la biologie des organismes, aussi bien des antagonistes que de leurs hôtes. Toute tentative prématurée pour introduire des modifications génétiques dans les mycoherbicides sans une étude préliminaire élargie peut conduire à une absence de succès ou pire, à des produits qui peuvent causer des risques agricoles et écologiques.

Perspectives d'avenir

Les systèmes de production de cultures dans lesquels les mauvaises herbes parasites constituent des problèmes majeurs sont sujets à une variété de pratiques de gestion agricole. Jusqu'à présent, l'impact de gestion d'agro-écosystème sur l'efficacité des agents de bio-contrôle a été rarement évalué. Beaucoup de candidats bio-herbicides sont au stade de développement, y compris l'évaluation de la formulation et de la livraison. Donc, l'étape prochaine à prendre en compte serait comment intégrer ces agents de bio-contrôle dans différents systèmes de gestion des cultures.

LES ACQUIS DANS LES APPROCHES DE CONTROLE INTEGRE

Considérant jusqu'ici les contraintes à un contrôle satisfaisant des plantes parasites, il est bien reconnu qu'aucune méthode de contrôle à elle seule ne peut fournir une solution efficace et économiquement acceptable. Donc, une approche de contrôle intégrée est essentielle, idéale et utile aux petits producteurs, pour atteindre une production durable. Les progrès accomplis avec les mesures de contrôle individuel de plantes parasites comme précédemment résumées et discutées dans ce chapitre, peuvent être importants pour la contribution à la réussite de toute approche intégrée proposée, par l'incorporation de tout élément nouveau adaptable et applicables. Aucun paquet standard de contrôle intégré des plantes parasites ne peut être recommandé; donc un paquet a besoin d'être ajusté aux systèmes de culture individuels, aux besoins et aux préférences locaux. Dans ce contexte, le développement et l'usage d'outils mathématiques de modélisation peuvent être utiles dans l'adaptation et l'optimisation des stratégies de contrôle des différents agro-écosystèmes (Manschadi *et al.* 1999).

Striga

Certains facteurs "clé" des systèmes de culture sont directement liés à l'avènement et l'intensité des infestations de *Striga*, comprenant: i) la longueur de la jachère; ii) la pratique de désherbage; iii) maintien de la fertilité du sol avec l'usage de résidus de récolte et le fumier organique; iv) la rotation culturale et la proportion de céréales (hôtes) dans la rotation; et v) l'usage, et l'accès aux intrants externes (herbicides, engrais) et les semences améliorées

(Kroschel, 1999). L'analyse de ces facteurs clé peut fournir des possibilités pour améliorer le système de culture, de même que l'identification des approches de contrôle les mieux adaptées, selon les situations spécifiques des fermiers. En ce qui concerne *Striga*, n'importe quelle stratégie idéale de contrôle intégré devrait considérer aussi bien la circonscription et le contrôle, que le besoin d'améliorer la fertilité du sol afin de réussir à atteindre une production agricole durable. Des exemples spécifiques des moyens par lesquels les divers éléments actuellement disponibles pour les fermiers, qui peuvent être évalués pour être inclus dans un programme intégré de contrôle de *Striga*, sont donnés par Ransom (1999) (Exemples I et II), Ejeta (2002) (Exemple III) et Louise *et al.* (2001) (Exemple IV).

Exemple I: Pour une zone qui est lourdement infestée avec *Striga*, où les graines de soja ont un marché prêt, et le maïs, céréale de base peut être achetée facilement sur le marché local, une approche intégrée pourrait inclure les éléments suivants:

- La rotation avec le soja, en utilisant une variété qui a un haut rendement et bien adaptée à la région. Afin de maintenir la productivité et la production à la ferme, il est probablement plus important de choisir la et/ou les variétés les plus productives et qui se vendent le mieux contrairement à celles qui stimulent le plus les semences de *Striga* mais sont autrement d'une faible performance. Cependant, toutes choses égales (rendement et adaptation), la variété qui stimule le plus efficace la germination des semences de *Striga* devrait être recommandée.
- Puisque le maïs est la céréale de base, probablement seulement la moitié de la ferme peut être soumise à la rotation avec une culture autre que le maïs. Dans la culture de maïs, le fermier devrait être encouragé à appliquer autant de fertilisants organiques que possible (par exemple les résidus de récolte, le fumier, etc..) et les engrais minéraux recommandés (ou la quantité maximum qu'il peut se procurer).
- Le fermier peut associer son maïs avec d'autres espèces s'il le désire, mais cela n'est pas nécessaire pour atteindre un contrôle maximum.
- Si le nombre qui émerge n'est pas écrasant, les plants de *Striga* devraient être arrachés à la main pour s'assurer qu'il n'y a pas de nouvelles additions à la banque de semences du *Striga*.
- Après la moisson, tous les résidus de récolte devraient être enfouis dans le sol.

Exemple II: Pour une zone où il y a un marché limité pour les légumineuses à graines, le blé ou le teff comme plantes non-hôtes du *Striga* peuvent être cultivés. L'approche intégrée suivante pourrait être considérée: I) le Blé ou le teff devraient être cultivés dans les zones les plus sévèrement affectés. La culture de ces non-hôtes permettrait la production d'une céréale de base. ii) Chaque effort pour améliorer la fertilité de sol devrait être utilisé, et devrait inclure engrais, résidus de récolte et fumier. iii). Si le sorgho ou le maïs sont exigés par les fermiers, les variétés locales de sorgho qui montre une tolérance considérable au *Striga* devraient être cultivées de préférence par rapport au maïs. iv). Le désherbage manuel ou le 2,4 D pour empêcher la reproduction des plants de *Striga* qui émergent devraient aussi être utilisés, en fonction de la pression du *Striga* et de la disponibilité de la main d'œuvre et des produits chimiques.

Exemple III: En Ethiopie, un paquet intégré de gestion du *Striga* a commencé récemment à être exécuté grâce aux fonds fournis par le Bureau d'Assistance Etrangère au Désastre (OFDA) de l'USAID. Il inclut des semences (variétés de l'INTSORMIL ou Brhan) de sorgho résistant au *Striga*, l'engrais azoté, et l'utilisation des billons cloisonnés comme une mesure de conservation de l'eau. En été 2003, au total mille fermiers éthiopiens de quatre régions où *Striga* est endémique participeront à ce programme de gestion.

IV d'exemple: En Côte D'Ivoire, un paquet de contrôle du *S. hermonthica* comprenant l'utilisation de variétés de maïs tolérantes (ACR 94TZL Comp de 5-w) au *Striga* en culture associée ou en rotation avec des cultivars de légumineuses (soja, niébé) a été rapporté comme étant efficace dans la réduction de l'infestation par le parasite et l'accroissement des rendements de maïs.

Orobanche

Une revue détaillée par Pieterse *et al.* (1992) et Parker et Riches (1993) suggérant les combinaisons possibles de méthodes de contrôle pertinentes pour *Orobanche* dans un certain nombre de cultures individuelles susceptibles, demeure encore très importante. Cependant, l'approche de contrôle intégrée suivante a été suggérée par Dhanapal *et al.* (2001) pour le contrôle de *O. cernua* dans le tabac en l'Inde:

- Cultiver les faux hôtes (*Crotalaria juncea*/*Vigna radiata*) au début printemps et incorporer *in situ* 45 jours après semis.
- Transplanter le tabac après 15–20 jours.
- Entreprendre un désherbage général 45 jours après transplantation (JAT).
- Appliquer le glyphosate à 60 JAT à 0.5 kg m.a. ha^{-1} (ou moins).
- Enlever à la main le peu de pousses d'orobanche qui restent ou appliquer des huiles végétales pour empêcher la formation de graines.

Pour le contrôle *O. crenata* dans *V. faba* au Maroc, le paquet devrait inclure:

a) traitement avec glyphosate;
b) rotation culturale avec un non-hôte et éviter de cultiver des plantes hôtes pour au moins 3–4 années dans le même champ;
c) désherbage manuel du reste des tiges de *Orobanche* avant et après la récolte et enlèvement des tiges du champ et leur incinération (Kroschel, 2001).

PROGRES DANS LA MISE EN OEUVRE DE MESURES DE CONTROLE

Dans les parties précédentes de ce chapitre, l'accent a été mis sur diverses méthodes de contrôle. Il est évident que la recherche a fait des progrès énormes dans l'élargissement de nos connaissances et sur les possibilités pour le contrôle des mauvaises herbes de parasites. Cependant, les options de contrôle qui peuvent être adoptées par les fermiers sont encore très limitées. Dans cette section nous mettons l'accent sur comment utiliser les résultats de recherche et comment aider les fermiers à réduire la menace que représentent les plantes parasites pour leur vie.

La formation des chercheurs, vulgarisateurs et des fermiers

Le processus de génération et de dissémination d'innovations agricoles implique plusieurs acteurs parmi lesquels les plus importants sont les fermiers, les vulgarisateurs et les chercheurs. Par conséquent, la formation de toutes ces trois catégories d'acteurs aidera à améliorer leurs capacités dans leurs domaines respectifs d'action dans le contrôle des mauvaises herbes parasites (Kachelriess, 2001). Les chercheurs ont besoin d'information et de formation sur les méthodes scientifiques. En plus, ils devraient acquérir et entraîner leurs compétences pour comprendre la rationalité des fermiers en vue de les aider dans le développement de technologies appropriées. Les vulgarisateurs ont la tâche importante de disséminer les innovations, et servir de lien entre les fermiers et les chercheurs. Mais, comme l'ont montré les diverses études, les vulgarisateurs sont souvent à peine équipés de connaissances spécifiques profondes de la biologie et du contrôle des mauvaises herbes parasites (Ghana: Sprich, 1994; Morocco: Kroschel *et al.* 1996b) et donc, ont besoin d'une

formation ciblée. Au Nord Ghana, par exemple, seulement 54.2 % des vulgarisateurs interviewés savaient que le *Striga* est un parasite. Au Maroc, l'usage du glyphosate pour contrôler *O. crenata* dans *V. faba* a été vulgarisé pendant plus de 15 années mais seulement 15 % des vulgarisateurs interviewés pouvaient donner une description exacte de sa technologie d'application. Donc, la formation du personnel de vulgarisation est comme une pièce importante dans la facilitation du travail pour un conseil efficace et dans l'aide aux fermiers pour évaluer et adopter une approche de contrôle intégré. En dehors de la connaissance technique, les vulgarisateurs peuvent exiger aussi la formation sur l'usage correspondant de matériel de vulgarisation et sur comment améliorer leurs techniques de communication. Les fermiers ont une connaissance plus universelle de l'agriculture. Ils peuvent avoir besoin de soutien, de conseil et de formation pendant qu'ils développent, expérimentent ou adoptent des innovations pour le contrôle des mauvaises herbes parasites (Kachelriess, 2001). Dans les années 90, les résultats d'étude des divers pays (Egypte: Müller-Stöver *et al.* 1999; Ghana: Sprich 1994; Kenya: Forst 1995; Madagascar: Geiger *Et al.* 1996; Malawi: Shaxson *et al.* 1993; Maroc: Lutzeyer *et al.* 1994; Kroschel *et al.* 1996; Tanzania: Reichmann *et al.* 1995) a clairement montré que les connaissances des fermiers sur la biologie des plantes parasites sont très faibles, ce qui est évidemment la raison pour laquelle les fermiers souvent ne réussissent pas la mise en application des méthodes de contrôle disponibles. Par conséquent, la formation des agriculteurs sur la biologie des plantes parasites est nécessaire dans chaque programme de vulgarisation pour qu'ils puissent comprendre et correctement appliquer les méthodes de contrôle.

Cours de formation

Dans le cadre du projet GTZ supra-régional Ecologie et Gestion des Mauvaises Herbes Parasites (*Ecology and Management of Parasitic Weeds*), et selon les besoins de tous les trois groupes d'acteurs dans le contrôle des plantes parasites, des curriculums spécifiques de formation ont été développés et exécutés au cours de la période 1989 à 1999 (Kachelriess et Kroschel, 2001). Des chercheurs et vulgarisateurs de haut niveau ont été formés par des enseignants universitaires et des chercheurs de Centres Internationaux de recherche Agricole (CIRA) dans des cours annuels internationaux, qui ont lieu deux fois par semaine de 1994 à 1998. Un total de 76 participants de 19 pays a assisté, venus principalement de l'Afrique mais aussi un certain nombre en provenance d'Asie. Les participants ont été formés sur la biologie et l'écologie des plantes parasites, leurs méthodes de contrôle, les aspects et les limitations économiques et socio-économiques impliquées dans l'introduction de méthodes de contrôle chez les petits fermiers, de même que sur les méthodologies de recherche, le développement participatif de technologies, la communication et la vulgarisation agricole. Les participants aux cours internationaux ont été souvent impliqués comme des personnes ressource dans les cours nationaux pour la formation des vulgarisateurs. Ces cours ont été organisés dans des régions pilotes du projet au Nord Ghana et au Maroc de même qu'au Bénin, à Madagascar et au Malawi en ce qui concerne le *Striga*, et en Algérie, Egypte et Tunisie en ce qui concerne *Orobanche*, respectivement. Les cours de formation ont eu pour les participants les objectifs suivants (Kachelriess *Et al.* 1999) :

- Etre compétent en et être capable d'expliquer la biologie et l'écologie des plantes parasites et,
- Avoir la connaissance sur les différentes méthodes de contrôle et pouvoir choisir et combiner des méthodes de contrôle adaptées.
- Etre sensibilisé sur du matériel de vulgarisation et son utilisation.
- Etre capable de stimuler une discussion avec, et parmi, les fermiers.
- Etre préparé à discuter les essais en milieu réel avec les fermiers et les chercheurs au champ.
- Avoir l'occasion d'échanger des expériences avec les collègues.
- Etre capable de former les autres membres du personnel en tant que formateur.

Les expériences ont été échangées entre les personnes ressources et les participants sous forme de présentations orales. Les participants ont eu l'occasion pour faire entrer leurs expériences dans les discussions. Les Formateurs n'ont pas enseigné dans une approche verticale (du sommet vers le bas) mais par des réflexions et des discussions animées. Le travail en groupes a permis des discussions plus intensives et ont aidé à approfondir la connaissance. Les démonstrations pratiques sont très importantes pour renforcer la compréhension de l'information scientifique présentée. Il est aussi intéressant d'inclure les visites de champ pour échanger des idées avec les fermiers. Idéalement, des parcelles de démonstration et des expérimentations en milieu réel devraient être aussi inclues et discutées. Généralement, la durée de ces genres de cours de formation ne devrait pas dépasser trois jours pleins (Kachelriess et Kroschel, 2001).

Développement et utilisation de supports de vulgarisation appropriés pour le contrôle des plantes parasites

Les matériels de vulgarisation peuvent être disponibles sous forme d'imprimés, tel que les prospectus techniques, les manuels, les brochures mais aussi par la presse, les pièces jeu de rôle, les séries d'images, les communications de masse, tels que la radio ou les supports audio visuelles, les bandes vidéo et autres. Un aperçu général de leurs avantages et inconvénients comparatifs est donné par Albrecht *et al.* (1990). Les utilisateurs potentiels sont les vulgarisateurs. Le matériel devrait être disponible pour les fermiers pendant les activités de vulgarisation (par exemple les images) mais aussi comme matériel d'information pour les vulgarisateurs (par exemple les fiches techniques) (Kachelriess *et al.* 2001). La sensibilisation des fermiers sur la biologie (reproduction, quantité et longévité des semences, différences entre plantes hôtes et faux hôtes, etc.) des plantes parasites est souvent un goulot d'étranglement pour l'introduction de méthodes de contrôle. En plus, il y a le manque de connaissance des fermiers sur l'utilisation appropriée des méthodes de contrôle. Par conséquent, l'adaptation de méthodes de contrôle aux situations individuelles au champ est difficile et les fermiers sont rarement à même de prendre des décisions judicieuses sur le contrôle de plantes parasites. Les rapports de recherche et les publications scientifiques ne sont pas convenables pour l'utilisation par les fermiers. Donc, il est essentiel de présenter cette information de façon à ce que les vulgarisateurs et les fermiers puissent l'utiliser. Tenant compte du grand taux d'analphabétisme, la méthode pour communiquer cette information devrait convenir aux conditions socioculturelles locales (Kachelriess *et al.* 2001). Dans le travail de vulgarisation pour les plantes parasites au Nord Ghana et au Maroc des expériences valables ont été exécutées avec l'utilisation de supports visuels de vulgarisation (Feil *et al.* 1997, Fischer, 1999, Kachelriess *et al.* 1996, Loudie *et al.* 1999, Kroschel *et al.* 1997). Ceux-ci ont été développés comme des séries de plus de 40 images colorées aux mains destinées aux vulgarisateurs et aux groupes de fermiers. La série pour la vulgarisation est divisée en trois parties: (i) la conscientisation; (ii) la biologie; et (iii) les méthodes de contrôle. Les images sont montrées à un groupe de fermiers et le vulgarisateur sert de modérateur et stimule des discussions dans le groupe. L'information et les indications nécessaires pour celui qui fait la présentation sont écrites sur le dos des images. Après la présentation de chaque image, une série d'images est alors fixée en conséquence à un tableau à feutre, indiquant le cycle de vie du parasite, par exemple. Cependant, il doit être considéré et noté que les supports visuels ne peuvent pas être copiés simplement pour être utilisés dans diverses conditions agricoles, mais doivent être adaptés par un processus créatif, par le développement participatif de matériel avec les chercheurs, les vulgarisateurs et les agriculteurs.

CONCLUSIONS

Durant la dernière décade et à l'aide de technologies nouvelles, les efforts de recherche fondamentale et appliquée ont engendré une richesse de connaissances scientifiques pour une meilleure compréhension et amélioration de la gestion intégrée durable des mauvaises herbes parasites. Comme a été résumé et discuté, le progrès significatif atteint dans les diverses mesures de contrôle de mauvaises herbe parasites individuelles est extrêmement pertinent pour le succès d'une quelconque approche de contrôle intégrée proposée et/ou appliquée par l'incorporation des composantes récemment adaptées et applicables. Cependant, bien que les mots 'contrôle 'intégré' soient devenus des mots magiques dans la gestion des plantes parasites, il n'existe pas des études sur le long terme dans lesquelles le contrôle intégré a été essayé et s'est révélé comme étant la clé du contrôle des plantes parasites dans le champ. Puisqu'il n' y a pas de paquet standard de 'contrôle intégré' pour les plantes parasites qui peut être exhibé, les options de contrôle pertinentes doivent être ajustées aux systèmes de culture individuels, aux besoins locaux' et aux préférences des fermiers. En dépit du grand nombre d'options de contrôle possibles, seulement quelques-unes ont été adoptées par les fermiers. En plus d'autres raisons, le manque de canaux actifs (personnel de vulgarisation) et de liens entre fermiers et chercheurs pour disséminer les innovations et transférer les technologies disponibles sont vues comme les contraintes principales. Donc, la formation du personnel de vulgarisation est un élément important dans la facilitation d'un travail efficace de conseillers et pour aider les fermiers à évaluer et adopter une approche de contrôle intégré. Pour atteindre les applications en champ, les facteurs clé restent la mise en application et l'expérimentation au champ d'options de contrôle accessibles, de même qu'un échange d'idées, d'expériences et d'information entre les différents groupes de chercheurs et de fermiers. Par un tel système de feed-back, une amélioration continue et rapide des stratégies de contrôle adaptables pourrait être réalisée, et, on peut espérer, que ce sera la clé d'une gestion satisfaisante des plantes parasites à l'avenir.

BIBLIOGRAPHY

Abbas, H.K. & Boyette, C.D. 1992. Phytotoxicity of fumonisin B1 on weed and crop species. *Weed Tech.* 6: 548-552.

Abbasher, A.A. 1994. Microorganisms associated with *Striga hermonthica and possibilities of their utilization as biological control agents.* PLITS 12 (1), Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, 144 pp.

Abbasher, A.A. & Sauerborn, J. 1992. *Fusarium nygamai*, a potential bioherbicide for *Striga hermonthica* control in sorghum. *Biocontrol* 2: 291-296.

Abbasher, A.A., Hess, D.E. & Sauerborn, J. 1998. Fungal pathogens for biological control of *Striga hermonthica* on sorghum and pearl millet in West Africa. *African Crop Science Journal* 6: 179-188.

Abayo, G.O., English, T., Eplee, R.E., Kanampiu, F.K., Ransom, J.K. & Gressel, J. 1998. Control of parasitic witchweeds (*Striga* spp.) on corn (*Zea mays*) resistant to acetolactate synthase inhibitors. *Weed Sci.* 46 (4): 459-466.

Albrecht, H. H., Bergmann, G., Diederich, E., Grosser, U., Hoffmann, P., Keller, G. Payr & Sülzer, R. 1990. *Agricultural Extension, Volume 2, Examples and background material.* Rural Development Series, Sonderpublikation der GTZ, No. 238.

Alonso, L.C. 1998. Resistance to *Orobanche* and resistance breeding: A review. *In* Wegmann, K., L.J. Musselman and D.M. Joel., eds. Current problems of *Orobanche* researches. *Proc. of the 4th Int. Orobanche Workshop,* Albena, Bulgaria, 233-258.

Amalfitano, C. Pengue, R., Andolfi, A., Vurro, M., Zonno, M.C. & Evidente, A. 2002. HPLC analysis of fusaric acid, 10-11 dehydrofusaric acid and their methyl esters, toxic metabolites produced by weed pathogenic *Fusarium* species. *Phytochemical Analysis* 13 (5): 277-282.

Amsellem, Z., Zidack, N.K., Quimby, P.C., Jr. & Gressel, J. 1999. Long term dry preservation of viable mycelia of two mycoherbicidal organisms. *Crop Protection* 18: 643-649.

Amsellem, Z., Kleifeld, Y., Kerenyi, Z., Hornok, L., Goldwasser, Y. & Gressel, J. 2001. Isolation, identification, and activity of mycoherbicidal pathogens from juvenile broomrape plants. *Biological Control* 21: 274-284.

Auld, B.A. & Morin, L. 1995. Constraints in the development of bioherbicides. *Weed Tech.* 9: 638-652.

Bebawi, F.F. & Farah, A.F. 1981. Effect of parasitic and non-parasitic weed on sorghum. *Experimental Agriculture* 17: 337-341.

Bedi, J.S. 1994. Further studies on control of sunflower broomrape with *Fusarium oxysporum* f.sp. *orthoceras* – a potential mycoherbicide. *In* Pieterse, A.H., Verkleij, J.A.H. & ter Borg, S.J., eds. *Proc. 3rd Int. Workshop on Orobanche and related Striga Research.* Royal Tropical Institute, Amsterdam, The Netherlands, 539-544

Bedi, J.S. & Donchev. N. 1991. Results on mycoherbicides control of sunflower broomrape *(Orobanche cumana* Wall.) under glasshouse and field conditions. *In* Ransom, J.K., Musselman, L.J., Worsham, A.D. & Parker, C. eds. *Proc. 5th Int. Symp. on Parasitic Weeds.* CIMMYT, Nairobi, Kenya. 76-82.

Berger, F., Li, H., White, D., Frazer, R. & Leifert, C. 1996. Effect of pathogen inoculum, antagonist density and plante species on the biological control of damping-off by *Bacillus subtilis* Cot1 in high humidity fogging glasshouses. *Phytopathology* 86: 428-433.

Berner, D.K., Kling, J.C. & Singh, B.B. 1995. *Striga* research and control, a perspective from Africa. *Plante Disease* 79: 652-660.

Boyetchko, S.M., 1999. Innovative applications of microbial agents for biological weed control. *In* Mukerji, K.G ed. *Biotechnological approaches in biocontrol of plante pathogens.* New York, Kluwer Academic/Plenum publishers, USA. 73-97.

Boyette, C.D., Jr.P.C. Quimby, A.J. Caesar, J.L. Birdsall, Jr.W.J. Connick, D.J. Daigle, M.A. Jackson, G.H. Egley and H.K. Abbas (1996). Adjuvants, formulation, and spraying system for improvement of mycoherbicides. *Weed Technology* 10: 637-644.

Bronstejn, C.G. 1971. On the biological control of the floral parasite of vegetable cucurbit and industrial crops (*Orobanche aegyptiaca* Pers.). In *13th Int.Congress of Entomology,* Moscow, 1968. Trudy, Nauka, Leningrad. 2: 134-135.

Cechin, I. & Press, M.C. 1993. The influence on growth and photosynthesis of sorghum infected with *Striga hermonthica* from different provenances. *Weed Res.* 34: 289-298.

Ciotola, M., Watson, A.K. & Hallett, S.G. 1995. Discovery of an isolate of *Fusarium oxysporum* with potential to control *Striga hermonthica* in Africa. *Weed Res.* 35: 303-309.

Ciotola, M., Di Tommaso, A. & Watson, A.K. 2000. Chlamydospore production, inoculation methods and pathogenicity of *Fusarium oxysporum* M12-4A, a biocontrol for *Striga hermonthica. Biocontrol Science and Technology* 10: 129-145.

Connick, W.J.J., Boyette, C.D. & McAlpine, J.R. 1991. Formulation of mycoherbicides using a pasta-like process. *Biological Control* 1: 281-287.

Cubero, J.I. 1994. Breeding work in Spain for Orobanche resistance in fève and sunflower. *In* Pieterse, A.H, Verkleij, J.A.C. & Borg, ter Borg, S.J. eds. *Proc. 3rd Int. Workshop on Orobanche and related Striga Research.* Royal Tropical Institute, Amsterdam, The Netherlands, 465-473.

Daigle, D.J., Connick,W.J.Jr., Boyette, C.D. Lovisa., M.P., Williams, K.S. & Watson, M. 1997. Twin-screw extrusion of 'Pesta'-encapsulated biocontrol agents. *World J.Microbiology and Biotechnology* 13: 671-676.

Dawoud, D.A., Sauerborn, J. & Kroschel, J. 1996. Transplanteing of sorghum: a method to reduce yield losses caused by the parasitic weed *Striga. In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D. M., Musselman, L.J. & Parker, C. eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. 6th Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 777-785.

Dhanapal, G.N., ter Borg, S.T. & Struik, P.C. 2001. Integrated approach to *Orobanche* control in India. *In* Fer, A.,Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. &

Verkleij, J.A.C. eds. *Proc. of the 7th Int.Parasitic Weed Symposium.* Nantes, France. 282-285.

Duke, S.O. 1986. Microbially produced phytotoxins as herbicides - a perspective. *In* Putnam, A. & Tang, C.S. eds. *The Science of Allelopathy.* New York, John Wiley and Sons, Inc. 287-304.

Egley, G.H, Eplee, R.E. & Norris, R.S. 1990. Discovery and development of ethylene as a witchweed seed germination stimulant. *In* Sand, P.F., Eplee, R.E. & Westbrooks, R.C., eds. *Witchweed Res. and Control in the United States.* WSSA, Champaign, IL. USA. 56-67.

Ejeta, G. 2002. *Striga biotechnology development and technology transfer.* INTSORMIL Annual Report 2002, 25-30.

Ejeta, G., Butler, L.G. & Babiker, A.G.T. 1992. *New approaches to the control of Striga. Striga* research at Purdue University. Bulletin RB-991, Agricultural Experimental Research Station. West Lafayete, Indiana, Purdue University, USA. 27 pp.

Ejeta, G., Mohammed, A., Rich, P. & Melakeberhan, A., Housley, T.L. & Hess, D.E. 2000. Selection for mechanisms of resistance to *Striga* in sorghum. *In* Haussmann, B.I.G., Hess, D.E., Koyama, M.L., Grivet, L., Rattunde, H.F.W. & Geiger, H.H. eds. Breeding for *Striga* resistance in cereals. *Proc. of a workshop held at IITA., Ibadan, Nigeria.* Margraf Verlag, Weilkersheim, Germany, 29-37.

Elzein, A.E.M. 2003. Development of a granular mycoherbicidal formulation of *Fusarium oxysporum* 'Foxy 2' for the biological control of *Striga hermonthica.* In *Tropical Agriculture – Advances in Crop Research* 12 (2). Kroschel, J., ed. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany (in press).

Elzein, A. & Kroschel, J. 2003. Host range studies of *Fusarium oxysporum* 'Foxy 2': an evidence for a new *forma specialis* and its implications for *Striga* control. *BioControl* (accepted).

Elzein, A., Sauerborn, J., Müller-Stöver, D. & Kroschel, J. 2000. Effect of storage temperature, granule size, and inoculum type on the viability of *Fusarium oxysporum,* a pathogen of *Striga hermonthica,* encapsulated in wheat-kaolin 'Pesta' granules. *3rd Int. Weed Sci. Congress.* Foz do Iguassu, Brazil. 179.

Elzein, A.E.M., Kroschel, J. & Vebike, L. 2003. Seed treatment technology: A novel approach for controlling the parasitic weed *Striga* with *Fusarium oxysporum* 'Foxy 2'. In *Abstract, XI Int. Symposium on Biological Control of Weeds.* Canberra, Australia. 135.

Feil, P., Hummler, K. & Kachelriess, S. 1997. Development of visual extension material for a *Striga* control programme in Northern Ghana tRHough action research. *European J. of Agricultural Education and Extension* 4 (1): 1-16.

Fischer, P.A. 1999. Action research in extension material and message development: The *Striga* problem of northern Ghana revisited. *Kommunikation und Beratung (27).* Margraf Verlag, Weikersheim, Germany.

Foy, C.L., Jacobsohn, R. & Jain, R. 1988. Screening of *Lycopersicon* spp. for glyphosate and/or *Orobanche aegyptiaca* Pers. resistance. *Weed Res.* 28: 383-391.

Frost, H.M. 1995. *Striga hermonthica* surveys in Western Kenya. *Brighton Crop Protection Conference Weeds*, Brighton, UK, Vol. 1: 145-150.

Frost, D.L., Gurney, A.L., Press, M.C. & Scholes, J.D. 1997. *Striga hermonthica* reduces photosynthesis in sorghum: the importance of stomatal limitations and a potential role for ABA?. *Plante cell and environment* 20: 483-492.

Garcia-Torres, L. 1998. Reflection on parasitic weed control: available or needed technology.*In* Wegmann, K., Musselman, L.J. & Joel, D.M. eds. Current problems of *Orobanche* researches. *Proc. of the 4th Int. Orobanche Workshop.* Albena, Bulgaria. 323-326.

Garcia-Torres, L., Lopez-Granados, F., Jurado-Exposito, M. & Diaz-Sanchez, J. 1999. Chemical control of *Orobanche* spp. in legumes: Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level: Achievement and constraints. *In* Kroschel, J., Abderahibi, M. &, Betz, H.,

eds. *Vol. II. Joint Action to Control Orobanche in the WANA Region.* Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, 239-250.

Geiger, U., Kroschel, H.J. & Sauerborn, J. 1996. *Striga asiatica*, a problem in the Middle West of Madagascar. *In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C. eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. VIth Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 479-486.

Geipert, S., Kroschel, J. & Sauerborn, J. 1996. Distribution and economic importance of *Orobanche crenata* in fève production of Morocco. *In* Bertenbreiter, W. & Sadiki, M., eds. Rehabilitation of Fève. *Proc. 1st MagRHebian Seminar on Fève Research.* Rabat/Marokko, 113-120.

Gil, J. Martin, L.M. & Cubero, J.L. 1987. Genetics of resistance in *Vicia sativa* L. to *Orobanche crenata* Forsk. *Plante Breeding* 99: 134-143.

Goldwasser, Y., Kleifeld, Y. & Rubin, B. 1997. Variations in vetch (*Vicia* spp.) response to *Orobanche aegyptiaca* Pers. *Weed Sci.* 45: 756-762.

Gressel, J. 2000. Molecular biology for weed control. *Transgenic Research 9: 355-382.*

Gressel, J. 2001. Mitigating the spread and introgression of native and transgenic biological control agents. *In* Maurizio, V., Gressel, J., Butt, T., Harman, G.E., Pilgeram, A., Leger, R.J.St. & Nuss, D.L., eds. *Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Enhancing Biocontrol Agents and handling Risks.* 9-15 June 2001, Florence, Italy. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences – Vol. 339. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 167-176.

Harman, G.E. & Donzelli, B.G.G. 2001. Enhancing crop performance and pest resistance with genes from biological control agents. *In* Maurizio, V.J., Gressel, J., Butt, T., Harman, G.E., Pilgeram, A., Leger, R.J.St. & Nuss, D.L. eds. *Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Enhancing Biocontrol Agents and handling Risks* 9-15 June 2001, Florence, Italy. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences. Vol. 39. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands. 114-126.

Haussmann, B.I.G., Hess, D.E., Welz, H.G. & Geiger, H.H. 2000. Improved methodologies for breeding striga-resistant sorghums. *Field Crops Research* 66: 195-211.

Hess, D.E., & Haussmann, B.I.G. 1999. Status quo of *Striga* control: Prevention, mechanical and biological control methods and host plante resistance. *In* Kroschel, J., Mercer-Quarshie, Sauerborn, H.j. eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol. 1. Joint Action to Control *Striga* in Africa. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 75-87.

Hoagland, R.E. 1990. Microbes and microbial products as herbicides, an overview: *In* Hoagland, R.E., ed. *Microbes and microbial products as herbicides.* American Chemical Society Washington DC. pp. 2-52.

ICRAF. 1996. *Replenishing soil fertility tRHough improved Sesbania fallows and phosphorus fertilization.* International Centre for Research in Agroforestry. ICRAF Annual Report 1996, 147-152.

Jacobsohn, R. 2002. Chemical control of broomrape in Israel, successes and failures. In *2nd joint meeting of working groups 2 and 4 of COST Action 849,* Parasitic plante management in Sustainable agriculture, Obermarchtal, Germany. pp. 11.

Johnson, D.E., Riches, C.R., Jones, M.P. & Kent, R. 2000. The potential for host resistance to *Striga* on rice in West Africa. *In* Haussmann, B.I.G., Hess, D.E., Koyama, M.L., Grivet, L., Rattunde, H.F.W. & Geiger, H.H., eds. Breeding for *Striga* resistance in cereals. *Proc. of a workshop held at IITA, Ibadan, Nigeria.* Margraf Verlag, Weilkersheim, Germany. 139-145.

Jurado-Exposito, M., Castejon-Munoz, M. & Garcia-Torres, L. 1996. Broomrape (*Orobanche crenata*) control with imazethapyr applied to pea (*Pisum sativum*) seed. *Weed Tech.* 10: 774-780.

Jurado-Exposito, M., Castejon-Munoz, M. & Garcia-Torres, L. 1997. Broad bean and lentil seed treatments with imidazolinones for the control of broomrape (*Orobanche crenata*). *J. Agricultural Science* 129: 307-314.

Kachelriess, S. 2001. Training of researchers, extension staff and farmers. *In* Kroschel, J. ed. *A Technical Manual for Parasitic Weed Res. and Extension.* Kluwer Academic Publisher, The Netherlands. 159-161.

Kachelriess, S. & Kroschel, J. 2001. International training courses and national training of extension staff. *In* Kroschel, J., ed. *A Technical Manual for Parasitic Weed Res. and Extension.* Kluwer Academic Publisher, The Netherlands. 161-167.

Kachelriess, S. J., Kroschel, K., Hummler, V., Hoffmann, Osterburg, B. & Sauerborn, J. 1996. Linking farmers and researchers – Developing appropriate extension material to implement a farmer oriented *Striga* control Strategy in northern Ghana. Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C. eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. 6th Parasitic Weed Symposium,* Cordoba, Spain. 863-870.

Kachelriess, S., Fischer, P. & Kroschel, J. 1999. Sharing information between research and extension – training courses for extension staff. *In* Kroschel, J., in Parasitic Weed Mercer-Quarshie, H. & Sauerborn, J., eds. *Advances in parasitic weed control at on-farm level.* Volume I: Joint Action to Control *Striga* in Africa. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, 313-324.

Kachelriess, S., Hummler, K. & Fisher, P. 2001. Extension aids. *In* Kroschel, J., ed. *A Technical Manual for Parasitic Weed Res. and Extension.* Kluwer Academic Publisher, The Netherlands. 169-179.

Kanampiu, F.K., Friesen, D.K., Ransom, J.K. & Gressel, J. 2001a. Imazapyr seed dressings for *Striga* control on acetolactate synthase target-site resistant maize. *Crop Protection* 20: 885-895.

Kanampiu, F.K., Ransom, J.K. & Gressel, J. 2001b. Imazapyr and pyrithiobac movement from herbicide-coated maize seed controls *Striga* and does not preclude intercropping. *In* Fer, A.P., Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C., eds. *Proc. of the 7th Int. Parasitic Weed Symposium,* Nantes, France. 262-265.

Kapralov, S.I. 1974. *Phytomyza* against broomrape. *Zernovoe Chozjajstvo, Moskva* 13 (7): 43-44.

Khalid, S.A., Saber, H.A. El-Sherbeeny, M.H., El-Hady, M.M. & Saleen, S.R. 1993. Present state of *Orobanche* resistance breeding in fève in Egypt. *In* Pieterse, A.H., Verkleij, J.A.C. & ter Borg, S.J. eds. *Proc. 3rd Int.Workshop on Orobanche and related Striga Research.* Royal Tropical Institute, Amsterdam, The Netherlands. 455-464.

Khan, Z.R., Pickett, J.A., Van den Berg, J., Wadhams, L.J. & Woodcock, C.M. 2000. Exploiting chemical ecology and species diversity: stem borer and *Striga* control for maize and sorghum in Africa. *Pest Management Science* 56: 957-962.

Khan, Z.R., Hassanali, A., Khamis, T.M., Pickett, J.A. & Wadhams, L.J. 2001. Mechanisms of *Striga hermonthica* suppression by *Desmodium uncinatum* in maize-based farming systems. *In* Fer, A., Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C., eds. *Proc. of the 7th Int. Parasitic Weed Symposium,* Nantes, France. pp. 307.

Kim, S.K. 1994. Genetics of maize tolerance of *Striga hermonthica. Crop Science* 34: 900-907.

Kleifeld, Y., Goldwasser, Y., Plakhine, D., Eizenberg, H., Herzlinger, G. & Golan, S. 1999. Selective control of *Orobanche* spp. in various crops with sulfonylurea p*arasitic weed control at on-farm level.* Vol. II. Joint Action to Control Orobanche in the WANA Region. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 251-257.

Klein, O. & Kroschel, J. 2002. Biological control of *Orobanche* spp. with *Phytomyza orobanchia:* a review. *Biocontrol* 47: 245-277.

Kling, J.G., Fajemisin, J.M., Badu-Apraku, B., Diallo, A., Menkir, A. & Melake-Berhan, A. 2000. *Striga* resistance breeding in maize. *In* Haussmann, B.I.G., Hess, D.E., Koyama, M.L., Grivet, L., Rattunde, F.W. & Geiger, H.H. eds. Breeding for *Striga* resistance in cereals. *Proc. of a workshop held at IITA, Ibadan, Nigeria.* Margraf Verlag, Weilkersheim, Germany. 103-118.

Kroschel, J. 1998. *Striga* – How will it affect African agriculture in the future? – An ecological perspective. *In* Martin, K., Müther, J. & Auffarth, A. eds. *Agro-ecology, plante protection and the human environment: Views and Concepts.* PLITS 16 (2), Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 137-158.

Kroschel, J. 1999. Analysis of the *Striga* problem, the first step towards future joint action. *In* Kroschel, J., Mercer-Quarshie, H. & Sauerborn, J., eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol. I. Joint Action to Control Striga in Africa. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 3-25.

Kroschel, J. 2001. *A Technical Manual for Parasitic Weed Res. and Extension.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 256 pp.

Kroschel, J. & Sauerborn, J. 1996. Farming systems and the problems of applying *Striga* control methods - a comparison of case studies from northern Ghana, Tanzania and Malawi. *In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, B., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C., eds, Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. 6th Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 843-853.

Kroschel, J. & Elzein, A.E.M. 2003. Bioherbicidal effect of fumonisin B_1, a phytotoxic metabolite naturally produced by *Fusarium nygamai*, on parasitic weeds of the genus *Striga. Biocontrol Science and Technology* (in press).

Kroschel, J. & Müller-Stoever, D. 2003. Biological control of root parasitic weeds with plante pathogens. *In* Inderjit, ed. *Principles and practices in weed management: weed biology and weed management.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (in press).

Kroschel, J. & Klein, O. 2003. Biological control of *Orobanche* spp. in the Near East and NorthAfrica by inundative releases of the herbivore *Phytomyza orobanchia*. In *Proc. of Expert Consultation on IPM for Orobanche in Food Legume System in the Near East and North Africa.*Rabat, Morocco (in press).

Kroschel, J., Hundt, A., Abbasher, A.A. & Sauerborn, J. 1996a. Pathogenicity of fungi collected in Northern Ghana to *Striga hermonthica. Weed Res. 36:* 515-520.

Kroschel, J., Sauerborn, J. & Klein, O. 1996b. The supra-regional GTZ-project Ecology and Management of Parasitic Weeds approach to manage *Orobanche crenata* in Morocco. *In* Bertenbreiter, W. & Sadiki, M. eds., Rehabilitation of fève. *Proc. 1st MagRHebian Seminar on Fève Research.* Rabat/Morocco. 95-106.

Kroschel, J., Sauerborn, J., Kachelriess, S., Hoffmann, V. & Mercer-Quarshie, H. 1997. Possibilities and constraints in implementing *Striga* control methods in African agriculture. *In* Heidhues, F. & Fadani, A., eds., *Food security and innovations, successes and lessons learned.* International Symposium. Verlag Peter Lang, Frankfurt am Main, Germany, 121-135.

Kroschel, J., Jost, A. & Sauerborn, J. 1999. Insects for *Striga* control – Possibilities and constraints. *In* Kroschel, J., Mercer-Quarshie & Sauerborn, J. eds., *Advances in arasitic weed control at on-farm level.* Vol. 1. Joint action to Control Striga in Africa. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 117-132.

Kroschel, J., Mueller-Stoever, D., Elzein, A. & Sauerborn, J. 2000. The development of mycoherbicides for the management of parasitic weeds of the genus *Striga* and *Orobanche* - a review and recent results. *In* Spencer, N.R., ed. *Proc. of the Xth Int. Symposium on Biological Control of Weeds.* 4-14 July 1999, Bozeman, Montana, USA. pp. 139.

Lagoke, S.T.O., Parkinson, V. & Agunbiade, R.M. 1991. Parasitic weeds and control methods in Africa. *In* Kim, S.K., ed. *Combating Striga in Africa: Proc. of the Int. Workshop* organized by IITA, ICRISAT and IDRC, 22-24 August 1988, IITA, Ibadan, Nigeria. 3-14.

Lagoke, S.T.O., Shebayan, J.Y. & Magani, I. 1993. *Striga* problem and control in Nigeria. In *3rd General Workshop of Pan African Striga Control Network (PASCON).*Harare, Zimbabwe.

Lane, J.A., Child, D.V., Moore, T.H.M. & Bailey, J.A. 1995. Wild relatives of cereals as new sources of resistance to *Striga*. *In* Parasitic Plantes: Biology and Resistance. *International Workshop, 30 May - 2 June 1995*. IACR-Long Ashton Research Station, Bristol, UK pp. 13.

Lane, J.A., Child, D.V., Reiss, G.C., Entcheva, V. & Bailey, J.A. 1997. Crop resistance to parasitic plantes. *In* Crute, I.R., Holub, E.B. & Burdon, J.J., eds. *The Gene-for-Gene Relationship in Plante Parasite Interactions*. CAB International, 81-97.

Last, F.T. 1961. Direct and residual effects of *Striga* control treatments on sorghum yields. *Tropical Agriculture, Trinidad* 38: 49-55.

Linke, K.H., Sauerborn, J. & Saxena, M.C. 1989. *Orobanche field guide*. University of Hohenheim, Germany/ICARDA, Aleppo, Syria (also available in Arabic).

Loudie, N., Tijami, A. & Kachelriess, S. 1999. Developpment du materiel didactique pour le controle de l'*Orobanche* au Maroc (Bloc d'images). *In* Kroschel, J., Abderahibi, M., Betz, H., eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol. II. Joint Action to Control Orobanche in the WANA Region. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 299-316.

Louise, A., Bernard, D.G. & Sanhouin, Y. 2001. Integrated control of *Striga* in farmers' maize fields. *In* Fer, A., Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C., eds. *Proc. of the 7th Int.Parasitic Weed Symposium,* Nantes, France. pp. 302.

Lumsden, R.D., Lewia, J.A. & Fravel, D.R. 1995. Formulation and delivery of biological agents for use against soil-borne plante pathogens. *In* Hall, F.R & Barry, J.W., eds. *Biorational Pest Control Agents: Formulation and Delivery.* ACS Symposium Series 595, Washington, DC, USA. 166-182.

Lutzeyer, H.J., Kroschel, J. & Sauerborn, J. 1994. *Orobanche crenata* in legume cropping: farmers perception, difficulties and prospects of control – a case study in Morocco. *In* Pieterse, A.H., Verkleij, J.A.C. & ter Borg, S. J., eds. Biology and Management of *Orobanche. Proc. of the Third Int.Workshop on Orobanche and related Striga research.* Amsterdam, The Netherlands, Royal Tropical Institute. 432-441.

Maass, E. 2001. Spontaneous germination in *Striga*. *In* Fer, A. Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C.,.eds. *Proc. of the 7th Int. Parasitic Weed Symposium.* Nantes, France. pp. 129.

Manschadi, A.M., Sauerborn, J., Stützel, H., Kroschel, J. & Saxena, M.C. 1999. A model for simulation of growth and development in fève (*Vicia faba*) infected with *Orobanche crenata*. *In* Kroschel, J.M., Abderahibi M. & Betz, H., eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol. II. Joint Action to Control Orobanche in the WANA Region. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 79-104.

Mbwaga, A.M. & Riches, C.R. 2002. Sorghum cultivars released in Tanzania. *Hanstorium* 42: pp. 3.

Miele, S., Benvenuti, S., Macchia, M. & Pompeiano, A. 2001. *Orobanche* control in tobacco by using seed bank germination stimulant. *Combined meeting of working groups 1, 2, 3 and 4 of COST Action* 849. pp. 28.

Mohamed, K.I., Musselman, L.J. & Riches, C.R. 2001. The genus *Striga* (Scrophulariaceae) in Africa. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 88 (1): 60-103.

Mohammed, A., Rich, P., Housley, T.L., & Ejeta, G. 2001. *In vitro* techniques for studying mechanisms of *Striga* resistance in sorghum. *In* Fer, A., Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C., eds. *Proc. of the 7th Int. Parasitic Weed Symposium,* Nantes, France. 96-101.

Mugabe, N.R. 1983. Effect of *Alectra vogelii* Benth. on cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) I. Some aspects on reproduction of cowpea. *Zimbabwe J. of Agricultural Research* 21: 35-147.

Müller-Stöver, D, 2001. Possibilities of biological control of *Orobanche crenata* and *O. cumana* with *Ulocladium botrytis* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *orthoceras*. *Agroecology* 3. Apia Verlag, Laubach, Germany. 174 pp.

Müller-Stöver, D., Adam, M.A., Menoufi, O.A., & Kroschel, J. 1999. Importance of *Orobanche* spp. in two regions of Egypt – farmers' perception, difficulties and prospects of control. *In* Kroschel, J., Abderabihi, A. & Betz, H., eds. *Advances in parasitic weed control at on-farm level.* Volume II: Joint Action to Control *Orobanche* in the WANA region. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 37-52.

Musselman, L.J. 1987. *Parasitic weeds in agriculture. Volume I. Striga.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 317 pp.

Musselman, L.J. & Parker, C. 1981. Studies on indigo witchweed, the American strain of *Striga gesnerioides* (Scrophulariaceae). *Weed Sci.* 29: 594-596.

Natalenko, G.S. 1969. A biological method to control *Orobanche. Zascita Rastenij* 7: 12-13.

Nefkens, J.A.C.,Thuring, J.W.F.J., Beenakkers, M.F.M. & Zwanenburg, B. 1997. Synthesis of phthaloylglycine-derived Strigol analogue and its germination stimulatory activity toward seeds of the parasitic weed *Striga hermonthica* and *Orobanche crenata. J. of Agriculture and Food Chemistry* 45: 2273-2277.

Nelson, P.E., Desjardins, A.E. & Plattner, D. 1993. Fumonisins, mycotoxins produced by *Fusarium* species: Biology, chemistry, and significance. *Annual Review of Phytopathology* 31: 233-252.

Nelson, P.E., Dignani, M.C. & Anaissie, E.J. 1994. Taxonomy, biology and clinical aspects of *Fusarium* species. *Clinical Microbial Reviews* 7 (4), 479-504.

Norambuena, H., Kroschel, J. & Klein, O. 1999. Introduction of *Phytomyza orobanchia* for *Orobanche* spp. biocontrol in Chile. *In* Kroschel, J., Abderabihi, A. & Betz; H., eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm level.* Volume II: Joint Action to Control *Orobanche* in the WANA region. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 197-204.

Norambuena, H., Díaz, J., Kroschel, J., Klein, O. & Escobar, S. 2001. Rearing and field release of *Phytomyza orobanchia* on *Orobanche ramosa* in Chile. *In* Fer, A., Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C., eds. *Proc. of the 7th Int. Parasitic Weed Symposium,* Nantes, France. 258-261.

Odhiambo, G.D. & Ransom, J.K. 1996. Effect of continuous cropping with trap crops and maize under varying management systems on the restoration of land infested with *Striga hermonthica. In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C., eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. 6th Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 834-842.

Odhiambo, G.D. & Ransom, J.K. 1997. On-farm evaluation of an integrated approach to *Striga* control in western Kenya. *Proc. African Crop Science Conference.* Vol 3, 887-893.

Omanya, G.O 2001. *Variation for indirect and direct measures of resistance to Striga* (*Striga hermonthica (*Del.) Benth.) *in two recombinant inbred populations of sorghum* (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Verlag Grauer, Beuren, Stuttgart, Germany. 141 pp.

Oswald, A., Frost, H., Ransom, J.J., Kroschel, J., Shepherd, K. & Sauerborn, J. 1996. Studies on the potential for improved fallow using trees and sRHubs to reduce *Striga* infestations in Kenya. *In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C., eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. 6th Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 896-800.

Oswald, A., Ransom, J.K., Kroschel, J. & Sauerborn, J. 1999. Developing a catch-cropping technique for small-scale subsistence farmers. *In* Kroschel, J. Mercer-Quarshie, H. & Sauerborn, J., eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol. 1. Joint action to Control *Striga* in Africa. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 181-187.

Oswald, A., Ransom, J.K., Kroschel, J. & Sauerborn, J. 2001. Transplanteing maize (*Zea mays*) and sorghum (*Sorghum bicolor*) reduces *Striga hermonthica* damage. *Weed Sci.* 49: 346-353.

Oswald, A., Ransom, J.K., Kroschel, J. & Sauerborn, J. 2002. Intercropping controls *Striga* in maize based farming systems. *Crop Protection* 21: 367-374.

Pare, J., Ouedraogo, B., Dembele, G., Salle, G., Raynal-Roques, A. & Tuquet, C. 1996. Embryological studies as an efficient strategy to control production of *Striga* seeds. *In*

Moreno, M.T., Cubero, I.T., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C., eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. 6th Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 203-209.

Parker, C. & Riches, C.R. 1993. *Parasitic Weeds of the World: Biology and Control.* CAB International, Wallingford, Oxon, UK. pp. 332.

Pieterse, A.H., Garcia-Torres, L., Al-Menoufi, O.A., Linke, K.H., & ter Borg, S.J. 1992. Integrated control of the parasitic angiosperm *Orobanche* (broomrape). *2nd Int. Food Legume Research Conference.* Cairo, Egypt. pp. 9.

Quimby, P.C., Jr., Zidack, N.K. & Boyette, C.D. 1999. A simple method for stabilizing and granulating fungi. *Biocontrol Science and Technology* 9: 5-8.

Rambakudzibga, A.M., Manschadi, A. & Sauerborn, J. 2002. Host-parasite relations between cowpea and *Alectra vogelii. Weed Res.* 42: 249-256.

Ransom, J.K. 1999. The status quo of *Striga* control: Cultural, chemical and integrated aspects. *In* Kroschel, J., Mercer-Quarshie, H., Sauerborn, J., eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol.1: Joint action to Control *Striga* in Africa. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 133-143.

Rao, M.R. & Gacheru, E. 1998. Prospects of agroforestry *Striga* management. *Agroforestry* Forum 9 (2): 22-27.

Raynal-Roques, A. 1996. A hypothetic history of *Striga* – a preliminary draft. *In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C. eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. of the 6th Parasitic Weed Symposium.* Cordoba, Spain. 105-111.

Rehm, S. 1989. Hirsen. *In* Rehm, S. ed. *Spezieller Pflanzenbau in den Tropen und Subtropen.* Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, Germany. 79-86.

Reichmann, S. , Kroschel, J. & Sauerborn, J. 1995. Distribution and infestation of *Striga* species in Shinyanga region of Tanzania and evaluation of control methods. *Brighton Crop Protection Conference Weeds.* Brighton, UK. Vol. 1, 151-156.

Riches, C.R. 1989. *The biology and control of Alectra vogelii* Benth. (Scrophulariaceae) *in Botswana.* University of Reading, UK. (Ph.D. thesis)

Riches, C.R., Johnson, D.E. & Jones, M.P. 1996. The selection of resistance to *Striga* species in upland rice. *In* Moreno, M.T., Cubero, J.I., Berner, D., Joel, D.M., Musselman, L.J. & Parker, C. eds. Advances in Parasitic Plante Research. *Proc. of the 6th Parasitic Weed Symposinm.* Córdoba, Spain. 673-680.

Rodriguez-Ojeda, M.I., Fernandez-Escobar, F. & Alonso, L.C. 2001. Sunflower inbred line (KI-374) carrying two recessive genes for resistance against a highly virulent Spanish population of *Orobanche cernua* Loelf. / *O. cumana* Wallr. Race 'F'. *In* Fer, A., Thalouarn, P., Joel, D.M., Musselman, L.J., Parker, C. & Verkleij, J.A.C. eds. *Proc. of the 7th Int. Parasitic Weed Symposium.* Nantes, France. 208-211.

Saber, H.A., Omer, M.A., El-Hady, M.M., Mohmoud, S.A., Abou-Zeid, N.M., & Radi, M.M. 1999. Performance of a newly-bred fève line (X-843) resistant to *Orobanche* in Egypt. *In* Kroschel, J., Abderahibi, M., Betz, H. eds. *Advances in Parasitic Weed Control at On-farm Level.* Vol. II. Joint Action to Control *Orobanche* in the WANA Region. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany. 251-257.

Sands, D.C., Pilgeram, A.L. & Tiourebaev, K.S. 2001. Enhancing the efficacy of biocontrol agents against weeds. *In* Maurizio V., Gressel, J., Butt, T., Harman, G.E., Pilgeram, A., Leger, R.J.St. & Nuss, D.L., eds. *Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Enhancing Biocontrol Agents and handling* Risks 9-15 June 2001, Florence, Italy. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences – Vol. 339. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands. 3-13.

Sauerborn, J., Buschmann, H., Ghiasvand Ghiasi, K. & Kogel, K.H. 2002. Benzothiadiazole activates resistance in sunflower (*Helianthus annuus*) to the root-parasitic weed *Orobanche cumana. Phytopathology* 92: 59-64.

Scheffer, K. 1988. *Neue Möglichkeiten der Fruchtfolgegestaltung und Biomasseproduktion durch das PflanzverfaRHen bei Vermeidung von Bodenerosion, Nitrateintrag und Gülleüberdüngung.* VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongressband 1988, Teil II, 431-422.

Schmitt, U., Schluter, K. & Boorsma, P.A. 1979. *Control quimico de Orobanche crenata en habas.* Boletin Fitosanitario FAO, 29: 88-91.

Savard, M.E., Miller, J.D., Ciotola, M. & Watson, A.K. 1997. Secondary metabolites produced by a strain of *Fusarium oxysporum* used for *Striga* control in West Africa. *Biocontrol Science and Technology* 7, 61-64.

Sharon, A., Barhoom, S. & Maor, R. 2001. Genetic engineering of *C. gloeosporioides* f. sp. a*eschynomene. In* Maurizio, V., Gressel, J., Butt, T., Harman, G.E., Pilgeram, A., Leger, R.J.St. & Nuss, D.L. eds. *Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Enhancing Biocontrol Agents and handling Risks.* 9-15 June 2001, Florence, Italy. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences – Vol. 339. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands. 240-247.

Shaxson, L.J., Riches, C.R. & Seyani, J.H. 1993. Incorporating farmers' knowledge in the design of weed control strategies for smallholders. *Brighton Crop Protection Conference Weeds.* Brighton, UK. 1149-1154.

Singh, B.B. 2000. Breeding cowpea varieties with combined resistances to different strains of *Striga gesnerioides. In* Haussmann, B.I.G., Hess, D.E., Koyama, M.L.,Grivet, L., Rattunde, H.F.W. & Geiger, H.H. eds. Breeding for *Striga* resistance in cereals. *Proc. of a workshop held at IITA, Ibadan, Nigeria.* Margraf Verlag, Weilkersheim, Germany. 261-272.

Singh, B.B. & Emechebe, A.M. 1990. Breeding for resistance to *Striga* and *Alectra* in cowpea. *In* Ransom, J.K., Musselman, L.J., Worsham, A.D. & Parker, C., eds. *Proc. of the 5th Int. Symposium of parasitic weeds.* CIMMYT, Nairobi, Kenya. 303-305.

Sprich, H. 1994. *Bedeutung der Fruchtfolge zur Ertragssicherung in getreidebetonten Produktionssystemen der Guinea-Savanne unter besonderer Berücksichtigung des parasitischen Unkrauts Striga hermonthica* (Del.) Benth. PLITS 12(3), Margraf Verlag Weikersheim, Germany.

Streibig, J.C. 2002. Assessing relative efficacy of Nijmegen 1 for Striga control. *In 2nd joint meeting of working groups 2 and 4 of COST Action 849.* Parasitic plante management in sustainable agriculture, Obermarchtal, Germany. pp. 25.

Thomas, H. 1998. *Das Potential von Pilzen zur Kontrolle von Orobanche* spp. *unter Berücksichtigung von Anbausystemen im Tera, Nepal.* PLITS 16 (4), Margraf Verlag Weikersheim, Germany. 110 pp.

Thomas, H., J Sauerborn, Müller-Stöver, D., Ziegler, A., Bedi, J.S. & Kroschel, J. 1998. The potential of *Fusarium oxysporum* f.sp. *orthoceras* as a biological control agent for *Orobanche cumana* in sunflower. *Biological Control* 13: 41-48.

Traoré, D., Vincent, C. & Stewart, R.K. 1999. *Smicronyx guineanus* Voss and *S. umbrinus* Hustache (Coleoptera: Curculionidae): potential biocontrol agents of *Striga hermonthica* (Del.) Benth. (Scrophulariaceae). *In* Hess, D.E. & Lenné, J.M., eds. *Report on the ICRISAT Sector Review for Striga Control in Sorghum and Millet.* International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Bamako, Mali. 105-115.

Vasudeva-Rao, M.J. & Musselman, L.J. 1987. Host specificity in *Striga* spp. and physiological 'strains'. *In* Musselmann, L.J., ed. *Parasitic weeds in Agriculture, Volume I, Striga.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 13-25.

Walker, H.L. & Connick, W.J.J. 1983. Sodium alginate for production and formulation of mycoherbicides. *Weed Sci.* 33: 333-338.

Wapshere, A.J. 1974. A strategy for evaluating the safety of organisms for biological control. *Annals of Applied Biology* 77: 201-211.

Wegmann, K. 2002. Control of broomrape by germination stimulants. In *2nd joint meeting of working groups 2 and 4 of COST Action 849, Parasitic Plante Management in Sustainable Agriculture.* Obermarchtal, Germany. p. 29.

Wigchert, S.C.M., Kuiper, E., Boelhouwer, G.J., Nefkens, G.H.L., Verkleij, J.A.C. & Zwanenburg, B. 1999. Dose-response of seeds of the parasitic weed *Striga* and *Orobanche* towards the synthetic germination stimulants GR 24 and Nijmegen 1. *J. of Agriculture and Food Chemistry* 47: 1705-1710.

Worsham, A.D. 1987. Germination of witchweed seeds. *In* Musselman, L.J., ed. *Parasitic weeds in agriculture.* Vol. 1. *Striga.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 45-61.

Zain, A.E.M. 2002. Benzothiadiazole influencing host-parasite interactions. University of Hohenheim, Stuttgart, Germany. (M.Sc. thesis)

Zwanenburg, B. & Wigchert, S.C.M. 1998. The molecular inception of *Striga* and *Orobanche* seed germination. *In* Wegmann, K., Musselman, L.J. & Joel, D.M., eds. Current problems of *Orobanche* researches, *Proc. of the 4th Int. Orobanche Workshop,* Albena, Bulgaria, 25-31.

Zonno, M.C., Vurro, M. Capasso, R. Evidente, A., Cutignano, A., Sauerborn, J. & Thomas, H. 1996. Phytotoxic metabolites produced by *Fusarium nygamai* from *Striga hermonthica*. *In* Moran, V.C. & Hoffmann, J.H., eds. *Proc. of the IX Int. Symposium on Biological Control of Weeds,* 19-26 January 1996, Stellenbosch, University of Cape Town, South Africa. 223-226.

La gestion des mauvaises herbes dans les cultures maraîchères

C. Zaragoza

INTRODUCTION

Les cultures maraîchères imposent une approche particulière de gestion des mauvaises herbes. Les superficies maraîchères sont de petite taille, mais produisent des cultures de haute valeur qui sont commercialement et gastronomiquement appréciées. Les cultures maraîchères à fruits et à feuilles fournissent un important revenu pour les fermiers et les ouvriers agricoles sur le plan local et régional. Comme évidence des petites superficies cultivées pour faire croître les cultures maraîchères, en Espagne, pour l'année 1999 les superficies étaient de 395 300 ha, avec une production d'environ 12 millions de tonnes.

L'irrigation est une autre caractéristique typique de ces cultures dans les zones méditerranéennes ou arides. Le type d'irrigation utilisé aussi conditionne la gestion des mauvaises herbes parce que plusieurs systèmes sont disponibles: l'irrigation traditionnelle par l'inondation ou par les sillons, et la plus moderne que représentent l'aspersion, l'irrigation par goutte et infiltration. Les herbicides ont différents comportements. Leur incorporation est affectée par l'eau et la sélectivité de la culture peut ainsi être substantiellement réduite.

La zones où se pratiquent traditionnellement les cultures maraîchères sont d'habitude adjacentes aux cours d'eau navigables, aux plaines d'inondation, aux deltas des fleuves, aux zones marécageuses, et, si des herbicides sont utilisés, leur impact sur l'environnement et les conditions d'utilisation doivent être pris en compte.

Certaines cultures maraîchères sont produites sous "paillis" en matière plastique, qui peut affecter le comportement de l'herbicide, réduire sa volatilité et les phénomènes de condensation, et la sélectivité des cultures pourrait être modifiée.

Par suite de tous ces problèmes et à cause des petits domaines emblavés en cultures maraîchères, les sociétés chimiques ne sont pas très intéressées par le développement d'herbicides spécifiques pour la gestion des mauvaises herbes dans ces cultures. Ce manque d'intérêt peut provoquer aussi la discontinuité des quelques herbicides sélectifs, tel que naptalam, bensulide, et d'autres du marché européen. Aux États – Unis, il y a aussi l'inquiétude en ce qui concerne les herbicides utilisés pour les cultures mineures. Un des projets basé là-bas, IR-4, a un mandat pour fournir des solutions de gestion des mauvaises herbes des cultures maraîchères aux États - Unis (Arsenovic et Kunkel, 2001).

Un autre aspect relatif à la complexité d'usage des herbicides est leur persistance dans le sol qui peut sérieusement affecter les prochaines cultures dans la rotation, par suite des résidus dans le sol. Les rotations de cultures maraîchères sont très rapides et intensives dans beaucoup d'endroits, et la toxicité des herbicides peut affecter la culture suivante si le cycle de la culture précédente est assez court.

Nous devons considérer tous ces aspects, de même que les inquiétudes des consommateurs sur la présence probable de résidus de pesticides dans les fruits, les feuilles et les racines de ces cultures et les limitations strictes pour la commercialisation et l'exportation peuvent invalider dur labeur et l'endurance de plusieurs ouvriers. Donc, un usage prudent d'herbicides est obligatoire, et de bonnes pratiques en champ doivent être suivies, surtout quand la reconnaissance d'un label de production est souhaitée.

Il y a un grand intérêt dans l'intégration de pratiques de labour avec le contrôle chimique à cause de la réduction de l'impact des herbicides et le coût de la main d'œuvre. Pendant que les herbicides jouent un rôle important dans l'horticulture extensive, très mécanisés, de plein air, le sarclage manuel est une pratique commune dans les cultures maraîchères, même suite à un traitement herbicide (par exemple les haricots verts peuvent avoir besoin de 5-15 h/ha et les tomates transplantés, 50-90 h/ha).

FLORE ADVENTICE

La composition de la flore actuelle des mauvaises herbes dans les cultures maraîchères a besoin d'être bien déterminée. Basé sur ces données, nous pourrons alors préparer une meilleure méthode de contrôle à être exécutée. Il est bien connu que les mauvaises herbes sont très bien adaptées aux cultures qu'elles infestent, à cause de leur caractéristiques morphologiques et phénologiques. Un exemple de cette situation est le cas des carottes ou les espèces ombellifères comme *Ammi majus, Torilis* pp., *Scandix pecten-veneris, Daucus* spp. sont les plus dominantes. Une culture de printemps peut être infestée par deux générations d'espèces: premièrement par celles qui sont adaptées aux températures froides, telles que *Capsella bursa-pastoris, Chenopodium album et Polygonum aviculare*, et plus tard par les thermophiles d'été *Portulaca oleraceae, Solanum nigrum, Cyperus rotundus* et *Amaranthus retroflexus.*

Quelques espèces annuelles avec un cycle court tel que *Sonchus oleraceus, Poa annua, Senecio vulgaris, Stellaria media* peuvent aussi vraisemblablement créer des problèmes dans quelques cultures maraîchères à certaines étapes de la rotation des cultures.

Les communautés des mauvaises herbes peuvent avoir diverses espèces, mais beaucoup d'entre elles sont plus adaptées à une culture particulière. Par exemple: *Echinochloa crus-galli, Amaranthus* spp., *Chenopodium album, Polygonum aviculare, Portulaca oleracea* et *Solanum nigrum* sont dominantes dans les tomates transplantées. Cependant, si cette plante est cultivée en semis direct, les mauvaises herbes qui émergent les premières telles que *Alopecurus myosuroides, Avena* spp., *Lolium* spp. et plusieurs espèces de la famille des Brassicaceae et des Asteraceae sont plus fréquentes.

De même, les mauvaises herbes qui sont fréquentes dans l'oignon semé précocement sont *Capsella bursa-pastoris, Sinapis arvensis, Poa annua, Sonchus* spp., *Polygonum aviculare.* Dans l'oignon transplanté, ou semé tardivement, *Echinochloa* spp., *Portulaca oleracea, Solanum* spp., *Setaria* spp. sont aussi fréquentes. Les mauvaises herbes parasites peuvent aussi être un problème dans les cultures maraîchères (*Orobanche crenata* dans les légumineues, Apiaceae et la laitue; *O. ramosa* dans les Solanaceae et Cucurbitaceae; *Cuscuta* spp. dans les légumineuses, la tomate, les carottes, l'oignon, l'asperge) (García- Torres, 1993). Quelques mauvaises herbes principales sont caractéristiques d'une zone, une région ou un pays (par exemple: *Galinsoga parviflora* en Pologne, *Polygonum arenastrum* en Israël, *Ambrosia artemisiifolia, Cirsium arvense* et *Amaranthus hybridus* résistante à la triazine, en France; *Abutilon theophrasti* en Italie, *Cyperus rotundus* au Portugal, en Espagne et au Maroc (Tei *et al.* 1999 et 2002).

Les problèmes majeurs dans les cultures maraîchères sont causés par les mauvaises herbes à feuilles larges parce que les graminées sont mieux gérées en rotation, ou elles peuvent être éliminées avec succès avec l'usage des herbicides sélectifs foliaires.

Avec une connaissance solide de la phénologie des mauvaises herbes et d'autres facteurs (température, hauteur des précipitations et schéma d'irrigation) au niveau local, il est possible de prédire quand et dans quelle culture certaines mauvaises herbes poseront des problèmes.

Evidemment, dans une culture protégé par un plastique, l'émergence des mauvaises herbes a lieu plus tôt et leur croissance a tendance à être plus grande.

COMPETITION DES MAUVAISES HERBES

Seulement quelques cultures maraîchères sont de bons compétiteurs avec la flore des mauvaises herbes parce qu'elles couvrent rapidement le sol, dépassant la croissance des mauvaises herbes. Les exemples sont le choux (*Brassica* spp.) ou les artichauts. Mais, la plupart des cultures maraîchères, tels que les Liliaceae, les carottes ou les piments dans les latitudes tempérées, croissent lentement et recouvrent le sol de façon éparse, souffrant fortement la compétition des mauvaises herbes, non seulement pour l'eau, les substances nutritives et la lumière, mais même pour l'espace. Ainsi, si le contrôle des mauvaises herbes n'est pas effectué en temps opportun, il n'y aura pas du tout de production. Il y a beaucoup d'exemples de problèmes dans la réduction du rendement des cultures (Labrada, 1996), ce qui indique la grande sensibilité des cultures maraîchères à la concurrence très précoce des mauvaises herbes et la nécessité de les contrôler aux premiers stades de développement des cultures.

La compétition des mauvaises herbes est surtout dramatique quand une culture maraîchère est cultivé en semis direct. La période critique de compétition des mauvaises herbes (en général la période pendant laquelle le contrôle des mauvaises herbes doit être effectué) est généralement plus longue dans le semis direct que dans les cultures transplantées. Par exemple, si le piment transplanté doit être désherbé de la deuxième semaine jusqu'au troisième mois après la transplantation pour empêcher 10 % de perte de rendement, le piment semé directement doit être désherbé pendant les quatre premiers mois après émergence pour empêcher la même perte (Medina, 1995). On suppose que quelques techniques traditionnelles peuvent augmenter la compétitivité des cultures (par exemple la transplantation, le buttage). Evidemment, les conditions de température et la densité de mauvaises herbes ont une grande influence sur la longueur des périodes critiques. Une vague de froid affectant les cultures maraîchères peut provoquer une croissance lente, une plus grande compétition et des pertes de rendement plus grandes.

LITS DE SEMENCES

Beaucoup de cultures maraîchères sont cultivées dans des lits de semences pour développer des plantules convenables pour la transplantation en champ. Les sols destinés aux lits de semences sont d'habitude légers, avec une bonne texture, et fumés pour obtenir une bonne émergence des plantes. Les lits de semences sont d'habitude irrigués par inondation et protégés par la matière plastique. Beaucoup de techniques de contrôle des mauvaises herbes sont déjà décrites dans le travail de Labrada, (1996). Ici, nous ajoutons quelques possibilités pour la gestion des mauvaises herbes.

Les faux lits de semences

Les anciens ('faux') lits de semences sont parfois utilisés pour les cultures maraîchères lorsque les autres pratiques sélectives de contrôle des mauvaises herbes sont limitées ou indisponibles. Le succès dépend du contrôle de la première vague d'émergence des mauvaises herbes avant l'émergence de la culture, et sur l'intervention minimale, qui réduit les vagues subséquentes des mauvaises herbes. Fondamentalement, cette technique consiste en ce qui suit:

1. La préparation d'un lit de semence 2–3 semaines avant plantation pour atteindre un maximum de germination des semences de mauvaises herbes près de la surface du sol.
2. Planter la culture avec un dérangement minimum du sol pour éviter d'exposer les nouvelles semences des mauvaises herbes à des conditions favorables de germination.
3. Traiter le champ avec un herbicide non-résiduel pour tuer toutes les mauvaises herbes germées (William *et al.* 2000) juste avant ou après plantation, mais avant l'émergence de la culture.

Les herbicides recommandés sont les bypiridyliums, le glyphosate, le sulfosate et le glufosinate-ammonium, entre autres. Dans les sols de texture légère, tel que le sable ou dans les milieux de culture artificiels, les traitements herbicides sont à risque pour les cultures (surtout dans la tomate). Avec le glyphosate ou le sulfosate, il est recommandé qu'ils soient appliqués dix jours avant la plantation. Il est aussi possible de traiter le sol avec le metham sodium, mais la plantation doit être retardée jusqu'à ce que l'huile ne contienne plus de metham, habituellement après 20 jours. L'usage de ce fumigant est très efficace contre *Solanum nigrum* dans les tomates.

Solarisation

Elle est une méthode efficace pour le contrôle des maladies et des organismes nuisibles du sol qui peut aussi contrôler beaucoup de mauvaises herbes. La méthode a été précédemment décrite par Labrada (1996). Le sol doit être propre, avec une surface nivelée et mouillée préalablement, et couvert avec un plastique fin (0,1–0,2 mm) transparent et très bien scellé. Le sol doit être gardé couvert pendant les mois plus chauds et plus ensoleillés (30–45 jours). Les températures du sol doivent être au-dessus de 40° C pour exercer un bon effet sur les divers organismes nuisibles du sol, y compris les semences de mauvaises herbes. La solarisation du sol est une méthode de contrôle à large-spectre, simple, économiquement faisable et écologique. Elle n'affecte pas la propriété du sol et produit d'habitude de plus hauts rendements (Campiglia *et al.* 2000). Mais, il y a aussi quelques désavantages dans son utilisation. Par exemple, une irrigation préalable est une condition (ou des pluies abondantes et fréquentes) et le sol doit être gardé solarisé (pas de culture) pour une période d'au moins un mois. Les résultats sont souvent variables, et dépendent des conditions climatiques. Le froid (en haute latitude) ou les endroits nuageux ne sont d'habitude pas convenables pour exécuter la solarisation. Quelques espèces peuvent tolérer la solarisation (par exemple les espèces pérennes à enracinement profond: *Sorghum halepense, Cyperus rotundus, Equisetum* spp. et aussi quelques grosses semences de mauvaises herbes tels que les légumineuses). Après la solarisation la matière plastique doit être enlevée, et un labour profond ou la confection de buttes doivent être évités. Ce système est plus convenable pour les petits champs de cultures maraîchères, mais il a été mécanisé pour des domaines vastes de tomates. La solarisation du sol est largement utilisé en conditions de serre en matière plastique en Espagne méridionale. La biofumigation consiste à incorporer du fumier frais dans le sol, dans les parcelles destinées à la solarisation. La décomposition de la matière organique produit des gaz toxiques sous la matière plastique et renforce les effets biocides. Normalement le sol devrait être enlevé après la solarisation ou la biofumigation pour permettre aux gaz d'échapper du sol avant la plantation (Monserrat, 2001).

Le contrôle chimique dans les lits de semences

Il y a même moins d'herbicides homologués pour les lits de semences que pour les cultures directement plantées. Certains herbicides recommandés sont décrits par Labrada (1996). Le tableau 1 montre quelques nouveaux ajouts.

Il y a plusieurs tueurs-de-graminées en post-levée (habituellement connus comme étant de la famille des 'fop' et 'dim') qui pourraient être bien utilisés dans les lits de semences des

cultures maraîchères, comme par exemple, le cycloxydim (pour l'oignon, les crucifères), le cletodim (oignon, tomates), le fluazifop-butyl (tomate, piment, laitue, poireau, oignon). Les doses doivent être faibles pour éviter tout problème de phytotoxicité (De Liñán, 2002).

Les traitements herbicides sous couverture en matière plastique sont toujours à risque et une application prudente devrait être effectuée. Sous matière plastique, des niveaux élevés d'humidité et de températures sont courants et les plantes grandissent très bien. La sélectivité pourrait être facilement perdue et les symptômes de phytotoxicité peuvent apparaître, bien que parfois, ils sont seulement temporaires. Les effets sont souvent irréguliers. La meilleure façon de faire avec est d'être prudent et de faire quelques essais avant un traitement général.

Tableau 1. Les herbicides sélectifs de pré-levée et de post-levée précoce pour les lits de semences des cultures maraîchères.

a) Pré-levée

Herbicide	Dose (kg m.a/ ha)	Culture
Clomazone	0.18 – 0.27	Piment, concombre
DCPA	6.0 – 7.5	Oignon, crucifères, laitue
Metribuzin	0.15 – 0.5	Tomate
Napropamide	1.0 – 2.0	Tomate, piment, aubergine
Pendimethaline	1.0 – 1.6	Oignon, ail
Proanide	2.0 1.0 – 2.5	Laitue
Propachlor	5.2 – 6.5	Oignon, crucifères

b) Post-levée (cultures avec au moins 3 feuilles)

Herbicide	Dose (kg m.a/ ha)	Culture
Clomazone	0.27 –0.36	Piment
Ioxinil	0.36	Oignon, ail, poireau
Linuron	0.5 – 1.0	Asperges, carotte
Metribuzin	0.075 – 0.150	Tomate
Oxifluorfen	0.18 – 0.24	Oignon, ail
Rimsulfuron	0.0075 –0.015	Tomate

CULTURES EN SEMIS-DIRECT ET CULTURES TRANSPLANTEES

Rotation culturale

La rotation culturale est la succession programmée des cultures pendant une période de temps sur la même parcelle ou champ. Elle est une méthode principale de contrôle pour réduire l'infestation des mauvaises herbes dans les cultures maraîchères. La rotation culturale a été considérée pendant longtemps comme une pratique fondamentale pour obtenir des récoltes saines et de bons rendements. Ce concept a été éliminé par erreur avec l'utilisation croissante des produits chimiques. En ce moment, cependant, la rotation des cultures gagne de l'intérêt et a de la valeur dans le contexte de gestion intégrée des cultures. Classiquement, les rotations de cultures sont appliquées comme suit:

1. Alternance des cultures avec différents types de végétation: les cultures à feuilles (laitue, épinard, crucifères), les cultures à racines (carottes, pommes de terre, radis), les cultures à bulbes (poireau, oignon, ail), les cultures à fruits (courge, poivre, melon).
2. Alternance des graminées et des dicotylédones, tel que le maïs et les cultures maraîchères.

3. Alternance de différents cycles de culture: les céréales d'hiver et les cultures maraîchères d'été.
4. Eviter la succession des cultures de la même famille: Apiaceae (céleri, carottes), Solanaceae (pomme de terre, tomate).
5. Alternance des mauvais compétiteurs (carotte, oignon) et des bons compétiteurs (maïs, pomme de terre)des mauvaises herbes.
6. Eviter les mauvaises herbes à problèmes dans des cultures spécifiques (par exemple les Malvaceae dans le céleri ou les carottes, les parasites et les pérennes en général).

Les exemples de rotation de cultures sont comme suit (Zaragoza *et al.* 1994) :

Dans les régions tempérées:	Piment - oignon - céréale d'hiver
	Melon - haricots - épinard - tomate
	Tomate - céréale - jachère
	Laitue - tomate – choux-fleurs
	Pomme de terre - haricots - crucifères - tomate- carottes
	Melon - artichaut (x 2) - haricots – bétérave rouge - blé – crucifères
Dans les régions tropicales:	Tomate - gombo - haricot vert
	Patate douce - maïs - *Vigna radiata*

L'introduction d'une jachère dans la rotation est essentielle pour le contrôle des mauvaises herbes difficiles (par exemple les pérennes), le nettoyage du champ avec un labour approprié ou l'utilisation d'un herbicide à large spectre. Il est aussi important d'éviter l'émission des semences ou autres propagules des mauvaises herbes.

Cultures associées

Faire pousser deux ou plusieurs cultures en même temps et de façon adjacente est appelé culture mixte, ou association culturale. Les cycles des cultures doivent coïncider totalement ou partiellement (culture relais-). Les avantages sont un meilleur usage de l'espace, de la lumière et autres ressources, une protection physique, un équilibre thermique favorable, une meilleure défense des plantes contre quelques organismes nuisibles et peu de problèmes de mauvaises herbes parce que le sol est mieux couvert. Les inconvénients sont la compétition des cultures entre elles, difficultés de gestion et de mécanisation, un plus grand besoin de main-d'œuvre, le contrôle incomplet des mauvaises herbes. Parfois les résultats sont moins productifs que s'il s'agissait seulement d'une culture. Habituellement les cultures 'compagnes' sont des plantes à croissance rapide et à faible croissance, des plantes rampantes et érigées, ou des espèces symbiotiques. Quelques exemples sont:

Dans les régions tempérées:

- laitue + carottes;
- crucifères + poireau, oignon, céleri, tomate;
- maïs + haricots, soja.

Dans les régions tropicales: cette technique est très bien adaptée au système agricole traditionnel:

- maïs + haricots + courge, manioc;
- tomate + pois d'angole, manioc;
- canne à sucre + oignon, tomate.

Mesures préventives

Celles-ci peuvent être très utiles (mais sont, malheureusement, toujours oubliées), étroitement liées aux rotations des cultures et nécessaires quand aucune mesure directe de contrôle des mauvaises herbes ne peut être prise pour des raisons économiques. Elles sont basées sur une réduction de la banque de semences et des propagules du sol et la prise de conscience précoce des infestations.

Il est nécessaire d'éviter l'invasion des nouvelles espèces par l'usage de matériel de plantation propre, et de prévenir la dispersion des semences par l'eau d'irrigation, les instruments et les machines. Un enregistrement (données) écrit de la situation des mauvaises herbes dans les champs est très utile. Un autre aspect est d'empêcher la dispersion des mauvaises herbes pérennes (ou des mauvaises herbes parasites) par l'usage de traitements et des labours opportuns et l'usage de labour de drainage pour empêcher la propagation de quelques espèces qui nécessitent de hauts niveaux d'humidité *(Phragmites* spp., *Equisetum* spp., *Juncus* spp.) Il est aussi nécessaire de scruter les bords du domaine pour empêcher des invasions, agir seulement quand c'est nécessaire, en ayant en esprit l'utilité des extrémités et des abords pour contrôler l'érosion et abriter une faune utile (Zaragoza, 2001).

La préparation du sol et le labour

Comme l'a déclaré Labrada (1996), une préparation du sol convenable dépend d'une bonne connaissance des espèces de mauvaises herbes prévalant dans le champ. Quand les mauvaises herbes annuelles sont prédominantes (Crucifères, *Solanum,* graminées) les objectifs sont le déterrement et la fragmentation. Ceci doit être atteint par un labour superficiel. Si les mauvaises herbes n'ont pas de semences dormantes (*Bromus* spp.), un labour profond pour enterrer les semences sera judicieux. Si les semences produites sont dormantes, ceci n'est pas une bonne pratique, parce qu'elles seront viables encore quand elles sont ramenées à la surface de sol après un labour ultérieur.

Quand les mauvaises herbes pérennes sont présentes, les outils appropriés dépendront des types d'enracinement. Les racines pivotantes *(Rumex* spp.) ou les racines à bourgeons *(Cirsium* spp.) exigent une fragmentation qui peut être faite en utilisant un girobroyeur ou un cultivateur. Les rhizomes fragiles (*Sorghum halepense)* nécessitent un arrachage et une exposition à la surface de sol pour en finir avec, mais les rhizomes flexibles *(Cynodon dactylon*) exigent d'être arrachés et enlevés du champ. Ceci peut être fait avec un cultivateur ou une herse. Les tubercules (*Cyperus rotundus)* ou les bulbes (*Oxalis* spp.) exigent la coupe quand les rhizomes sont présents et nécessitent d'être déterrés pour exposition aux conditions adverses (le gelou la sécheresse). Ceci peut fait avec la charrue à disque ou le niveleur. Le cultivateur à ciseau est utile pour drainer les champs inondés et réduire l'infestation des hygrophiles pérennes à enracinement profond (*Phragmites, Equisetum, Juncus).* C'est pourquoi des informations fiables sur les mauvaises herbes sont toujours nécessaires.

Le succès de plusieurs opérations de contrôle des mauvaises herbes dépend du timing de la mise en application (Forcella, 2000). L'occasion pour l'opération mécanique est en effet essentielle. Une action doit être prise contre les mauvaises herbes annuelles avant que la dispersion des semences ait lieu. L'efficacité du labour contre les pérennes est plus grande lorsque les réserves de la plante se dirigent vers le haut (par exemple *Convolvulus arvensis* au printemps. En automne il y a plus de fragments de racines) (Nogueroles et Zaragoza, 1999).

Les bonnes pratiques dans les opérations mécaniques doivent tenir compte des conditions optimales suivantes:

- la densité de plantation doit être fonction de la largeur de travail de l'instrument de désherbage;
- le choix d'outils adéquats nécessaires pour le travail;
- faire attention au stade de mauvaises herbes et de la culture et éviter les retards dans les interventions;
- le réglage de la profondeur de travail, la vitesse d'avancement, l'angle d'attaque;
- le taux d'humidité est important; chercher un bon nivellement;
- ne pas augmenter l'érosion du sol: éviter le labour parallèle à la pente;
- prévoir les conditions climatiques après l'achèvement de travail. Eviter le labourage si des précipitations sont prévues.

En Allemagne, des effets négatifs très limités ont été engendrés avec l'utilisation du contrôle mécanique des mauvaises herbes. Les pertes de plante moyennes après le travail à la houe, billonnage plus hersage étaient 3.0–3.5 % (Laber *et al.* 2000).

Une autre opération typique qui exige un labour mécanique est l'incorporation au sol d'herbicide. Quelques herbicides très volatiles ordinairement utilisés dans les cultures maraîchères (par exemple trifluraline) doivent être incorporés à fond dans le sol à une profondeur suffisante (5–7 cm). L'instrument utilisé pour l'incorporation de l'herbicide doit être en bon état. Par exemple, les lames de girobroyeur doivent être aiguisées. Les lames en forme de L sont les meilleures pour l'incorporation chimique. Pour une incorporation exacte le sol ne doit ni être trop mouillé ni aussi trop sec. Dans le premier cas, il serait commode de remplacer le girobroyeur par une herse flexible ou rigide. Les morceaux intacts de mottes de fumier ou de sol peuvent réduire l'efficacité du traitement (Kempen, 1989).

Matériel pour paillis

L'usage de paillis en matière plastique est très populaire dans beaucoup de champs de cultures maraîchères. Un plastique non transparent est utilisé pour empêcher la transmission de rayonnements photosynthétique par la matière plastique aux mauvaises herbes si bien que le développement des mauvaises herbes est alors arrêté. Les avantages sont aussi une meilleure conservation de l'humidité puisqu'une réduction dans les besoins d'irrigation, entraînent une réduction dans le lessivage de l'azote, une meilleure conservation des structures du sol, et une augmentation dans le rendement des cultures maraîchères dans un climat aride. Les inconvénients sont principalement le prix de la matière plastique (bien qu'il puisse être réemployé) de même que les coûts de gestion. Quelques mauvaises herbes pérennes ne sont pas contrôlées (en général *Cyperus* spp., *Convolvulus arvensis*) et le sarclage ou traitement des interlignes est nécessaire. Il est obligatoire d'enlever les résidus de matière plastique du champ sous forme d'ordures (le brûlage est interdit). Le paillage en matière plastique noir sur les lignes de la culture et le sarclage dans les interlignes est une option satisfaisante pour la culture de tomate bio et les producteurs de melon en Europe Méridionale. D'es autres matériels organiques (écorce, paille, résidus de plante) peuvent être utilisés, spécialement s'il y a une source bon marché disponible et proche. Leurs avantages sont similaires au paillis en matière plastique, mais les mauvaises herbes peuvent facilement émerger à la surface si la couche n'est pas assez épaisse. En fonction des matériels utilisés, il peut y avoir des problèmes spécifiques (par exemple, danger d'incendie en cas d'usage de paille, et le vent ou l'inondation peuvent enlever les matériels de paillage). Certains matériels peuvent augmenter la population des ennemis des cultures: les rongeurs, les escargots. Bien sûr, du sarclage manuel est souvent toujours nécessaire (Nogueroles et Zaragoza, 1999).

Contrôle chimique des mauvaises herbes

La meilleure approche pour minimiser les dépenses et éviter les problèmes écologiques est d'appliquer les herbicides sur les lignes des cultures à une distance de 10–30 cm (Labrada, 1996). L'application sur bande réduit l'usage d'herbicide jusqu'à 75 % en comparaison d'une application générale. Les mauvaises herbes sur les lignes sont alors contrôlées et celles qui sont entre les lignes peuvent être enlevées par le sarclage. Le tableau 2 montre les options d'herbicides sélectifs qui peuvent être utilisées dans les cultures maraîchères.

Le diphenamid était un bon herbicide pour les cultures maraîchères mais, il n'est plus commercialisé. Aucun de ces herbicides n'est efficace dans le contrôle des mauvaises herbes pérennes. Le halosulfuron est un nouveau composé sélectif pour les cucurbitacées et autres cultures maraîchères avec une action contre *Cyperus* spp. (Webster, 2002).

Parfois, une combinaison de deux herbicides ayant différents spectres de contrôle des mauvaises herbes peut être utilisée. Les mélanges de différents herbicides sont possibles (par exemple isoxaben + trifluralin, DCPA + propachlor, bensulide + naptalam) pour atteindre la meilleure efficacité, mais des expérimentations préalables sont nécessaires. Quelque herbicides peuvent testés contre le parasite *Cuscuta* spp., tel que DCPA, pendimethaline, pronamide et imazethapyr (Garcia-Torres, 1993).

Pour le contrôle sélectif des graminées dans les cultures maraîchères l'usage de quelque herbicides foliaires est recommandé, tel que cicloxidim (contre les annuelles: 0.1–0.25 kg m.a./ha, pérennes: 0.3–0.4), cletodym (0.1–0.2), fluazifop-butyl (annuelles: 0.15–0.25, pérennes: 0.5+0.25), haloxyfop-méthyle (0.05–0.2), propaquizafop (0.1–0.2), quizalofop (annuelles: 0.05- 0.125, pérennes: 0.1–0.2). Il est à noter qu'une application ne sera pas suffisante contre les pérennes. Leur activité foliaire est renforcée en ajoutant un surfactant non-ionique ou un adjuvant (Kempen, 1989; William *et al.* 2000; De Liñán, 2002).

L'usage de n'importe quel herbicide dans les cultures maraîchères nécessite des tests préalables pour vérifier son efficacité dans les conditions locales et sa sélectivité pour les cultivars disponibles.

Tableau 2. Herbicides sélectifs pour le contrôle des mauvaises herbes dans les cultures maraîchères

Herbicide	Dose kg ma/ha	Moment traitement (1)	Mauvaises herbes (2)	Cultures (3)
Alachlor	2.4	Post	Gd	choux, oignon
Benfluralin	1.17-1.71	PPI	Gd	laitue, ail
Bensulide	5.5-7.2	Pré	Gd	cucurbitacées
Bentazon	0.75-1	Post	D	pois verts, haricots verts
Le Chlorthal-dimetil (DCPA)	5.25-9.00	PP/Pré/ Post	Gd	oignon, laitue, cole, tomate, haricots verts
Clomazone	0.18-0.54	PP/Post	Gd	piment, pois verts
"	0.18-0.27	Pré	Gd	D.s. piment, concombres, courges, potiron
Clopyralid	0.70-0.92	Post	D	asperges
Diuron	0.4-2.4	Post	Dg	asperges
Ethalfluralin	0.8-1.7	PP	Gd	tomate, piment, haricots, courges
Halosulfuron	24-48 (g)	Pré/Post	Dg	courges, concombres
Ioxinil	0.36-0.60	Post	D	oignon, poireau, ail
Isoxaben	0.1-0.12	PPI	D	oignon, ail
Linuron	0.50-1.25	Pré	Dg	carotte, artichauts, asperges, fèves
Metabenztiazuron	1.75-2.45	Pré/Post	Dg	oignon, ail, fèves, pois
Metribuzin	0.35-0.52	PP/Post	GD	tomate, asperges
"	0.10-0.35	Pré/Post	GD	D.s. tomate, carottes, pois
Napropamide	1.57-2.02	PP/Post	Gd	tomate, piment, artichauts
Naptalam-Na	2.16-2.88	Pré	Dg	melons et cucurbitacées
Oxifluorfen	0.36-0.48	Pré/Post	Dg	oignon, ail, cole
"	0.24-0.48	PP	Dg	tomate, piment
Pendimethaline	1.32-1.65	PP/PPI	GD	artichauts, cole, laitue, poireau, piment, tomate, oignon, pois verts D.s. oignon
"	0.66-0.99	Pré	Gd	oignon
"	0.66-1.65	Post	GD	
Phenmedipham	0.55-1	Pré/Post	Dg	Betteraves, épinards,
Piridate	0.22-0.33	Post	D	choux
Prometryne	0.50-1.50	Pré/Post	Dg	artichauts, pois céleri, piment, tomate, carotte
Pronamide	0.70-1.50	Pré/Post	Gd	chicorée, laitue, endive
Propachlor	4.5	Pré	Gd	choux, oignon
Rimsulfuron	7.5-15(g)	Post	GD	tomate
Trifluralin	0.59-1.44	PPI	Gd	haricots, carottes, céleri, coles, artichauts, oignon, piment, tomate

Notes:

1) Le moment de traitement: PP: pré-plantation, PPI: pré-plantation incorporé, Pré: pré-levée, Post: post-levée.

2) Les mauvaises herbes contrôlées: GD: contrôle satisfaisant des graminées annuelles et des dicotylédones dans les conditions normales. Gd: principalement les graminées annuelles. Dg: principalement les dicotylédones. D: seulement les dicotylédones. G: seulement les graminées.

3) D'habitude on se réfère aux cultures transplantées. Cole (*Brassica*) indique Broccoli, germe de Bruxelles, chou, chou-fleur, chou-frisé, navet, rutabaga et radis. La sélectivité peut varier. D.s.: Semis direct.

Les arrières effets des résidus dans le sol

Certains herbicides ont une longue rémanence et peuvent affecter la culture suivante dans la rotation. Pour éviter cela, l'usage de l'émottage est recommandé ou alors deux passages croisés du motoculteur après la récolte pour mélanger les couches de sol traitées et non-traitées et ainsi disperser les résidus de l'herbicide. Les étiquettes des produits doivent toujours être consultées en ce qui concerne la culture par la suite de plantes sensibles aux traitements herbicides.

Dans les climats chauds et humides, habituellement les résidus se dispersent rapidement, mais dans tous les cas, la prudence est nécessaire. Quelques exemples de recommandations données dans les étiquettes de produits sont les suivants:

Napropamide: Après une période de deux mois, et après labour, il est possible de semer des pois, des haricots verts, des fèves, des céréales, des graminées fourragères, la bétérave sucrière et le lin.

Metribuzin: Après une période de trois mois et après labour, il est possible de semer plusieurs cultures, à l'exception des cucurbitacées, des crucifères, de la laitue, de la fraise, du tournesol, des pois, de la bétérave et du tabac.

Trifluralin: Après labour il est possible de semer: pois, haricots français, fèves crucifères, lentilles, artichauts, pomme de terre, orge, tournesol, luzerne, trèfle et carottes. Les épinards, la bétérave, l'avoine, le maïs et le sorgho ne devraient pas être semés avant une période de 12 mois.

Les bonnes pratiques dans l'utilisation des herbicides

Un résumé d'un 'décalogue' de bonnes pratiques dans l'utilisation des herbicides dans les cultures maraîchères extensives peut être fait (Zaragoza, 2001) :

- Périodiquement inspecter les champs et évaluer l'importance des mauvaises herbes. Identifier correctement les mauvaises herbes principales.
- Le stade de croissance des mauvaises herbes et des cultures doit être pris en compte.
- Le choix méticuleux du produit et du dosage, tout en ayant en esprit les points un et deux.
- Lire l'étiquette du produit et suivre les recommandations.
- Eviter des conditions adverses au moment de l'application: vent, températures, pluies. Ne pas retarder le traitement.
- La qualité de la pulvérisation est obtenue par le calcul exact du dosage (la surface à traiter doit être bien mesurée) et par l'équipement de pulvérisation qui doit être calibré et en bon état (surtout les buses et le manomètre).
- L'application en bande ou par spot pour épargner de l'herbicide et réduire les résidus.
- Respecter les normes écologiques: éviter le versement, la dérive, respecter les bords, les voies d'eau, les zones sensibles. Le triple-rinçage de tous les récipients (boîtes) et emballages vides, et ne plus les re-utiliser.
- Pour éviter la propagation d'espèces résistantes, le même ou les mêmes herbicides avec le même mode d'action ne doivent pas être utilisés de façon répétée.
- Il est essentiel d'intégrer le contrôle chimique des mauvaises herbes avec des labours opportuns de surface. Prendre des mesures préventives, spécialement l'identification précoce de problème.

Stratégie de gestion intégrée des mauvaises herbes pour des cultures maraîchères spécifiques

Quelques zones agricoles avancées ont développé des systèmes de gestion intégrée des mauvaises herbes. Quelques stratégies générales sont résumées ici (William *Et al.* 2000).

Haricots verts et pois: Les légumes moissonnés ne doivent pas contenir des baies de *Solanum*, des bourgeons de chardons, des tiges *d'Amarante*, ou des gousses de crucifères. Les rotations des cultures, les espacements serrés entre les lignes, le contrôle précoce des mauvaises herbes au cours de la saison et le labour (exception faite des endroits rocheux ou des sols emmottés) sont combinés avec les herbicides pour minimiser la compétition des mauvaises herbes et la contamination des produits. Un seul traitement de post-levée, peut supprimer la compétition des mauvaises herbes ou la contamination potentielle des pois moissonnés.

Carottes et céleri: Les carottes suppriment les mauvaises herbes quand les espacements des lignes, les densités de population, le sarclo-binage et l'application d'un herbicide sont combinés. Le sarclo-buttage empêche aussi la brûlure par le soleil ou les carottes vertes en versant la terre sur les racines.

Les betteraves de table ou betteraves rouges: Une combinaison de contrôle saisonnier précoce des mauvaises herbes, des lignes rapprochées, des populations denses, et le sarclo-buttage supprimera l'émergence des mauvaises herbes de mi-saison ou tardives après le développement du feuillage.

Les crucifères: La suppression des mauvaises herbes dans les crucifères commence par la rotation des cultures qui exigent des pratiques de contrôle différentes pour interrompre les cycles de vie des mauvaises herbes. L'espacement des lignes et la densité des plantes varie tous deux pour atteindre la taille des pommes, en fonction du marché, et afin d'éliminer les mauvaises herbes. Le contrôle saisonnier précoce des mauvaises herbes inclut l'application d'un herbicide et/ou un sarclo-buttage.

Les Cucurbitacées: La gestion des mauvaises herbes dans les cucurbitacées signifie la planification et l'intégration de plusieurs pratiques. Les rotations de cultures et le contrôle pré-plantation des mauvaises herbes susceptibles doivent être entrepris. Plusieurs producteurs pratiquent les faux lits de semences suivis par le sarclo-buttage, sauf au cours des saisons excessivement humides. Les espacements de lignes qui renforcent le développement du feuillage et le sarclo-buttage peuvent être complétés par une application d'herbicide sur les lignes de cultures. Souvent, des seigles brise-vent sont plantés entre les lignes et incorporés pendant le dernier sarclo-buttage.

Les plantes cultivées pour leurs feuilles (laitue, escarole, épinard) : La laitue semée directement exige quelques sarclo-buttages et un arrachage manuel ou un désherbage, tandis que la laitue transplantée arrive à maturité après 45 jours qui suivent un ou deux sarclo-buttages, avec un désherbage manuel mineur.

L'ail et l'oignon: L'ail exige un contrôle des mauvaises herbes presque parfait, puisqu'il émerge lentement, mûrit dans une période de 10–11 mois, et ne forme jamais de feuillage touffu avec la disposition de ces feuilles courtes et verticales. Donc, les planteurs contrôlent souvent toute la végétation de mauvaises herbes immédiatement avant l'émergence de la culture, appliquent un herbicide sélectif au sol pour le contrôle des mauvaises herbes d'hiver, et les traitements additionnels sont effectués au printemps, en fonction des infestations spécifiques de mauvaises herbes. Dans l'oignon, les mauvaises herbes sont gérées avec des

herbicides sélectifs combinés avec des sarclo-buttages fréquents. Les plantes de couverture d'hiver renforcent la gestion des mauvaises herbes du sol.

La tomate et le piment: Les mauvaises herbes peuvent être gérées par un labour préparatoire et un herbicide de pré-plantation dans les cultures transplantées. Le paillis en matière plastique noir peut aider à réduire les besoins en produits chimiques. Le labour des interlignes ou un herbicide de post-levée peut contrôler les mauvaises herbes par la suite. Dans les cultures de semis-direct, des traitements chimiques plus intensifs seront nécessaires. Pour la gestion de *Solanum nigrum* (une des mauvaises herbes les plus nuisibles dans la tomate), il faut avoir à l'esprit les points suivants:

- le contrôle chimique dans les cultures précédentes où cela est plus facile; (betterave, carotte, céleri, épinard);
- qu'il prévaut plus dans les tomates transplantées que dans les tomates en semis direct;
- la préparation des faux lits de semences avant la plantation de la tomate est recommandable;
- l'application à la plantation dans les lignes d'herbicides qui agissent dans le sol (pendimethaline, oxifluorfen) intégrée avec le sarclage des interlignes et/ou avec les traitements à dose fractionnée avec metribuzin + rimsulfuron contre *S. nigrum* aux tout premiers stades (jusqu'à deux feuilles) (Tei *et al.* 1999).

BIBLIOGRAPHIE

Arsenovic M. & Kunkel, D.L. 2001. *The IR-4 Project. A US National Agricultural Program for Pest Management Solutions.* EWRS Working Group, Meeting on Weed Management Systems in Vegetables, Zaragoza, Spain. p. 1.(also available at http://aesop.rutgers.edu/~ir4).

Campiglia, E., Temperini, O., Mancinelli, R., Saccardo, F., Stoffella, P., Cantliffe, D. & Damato, G. 2000. Effects of soil solarization on the weed control of vegetable crops and on cauliflower and fennel production in the open air. 8th Int. Symp. on Timing of Field Production in Vegetable Crops. Bari, Italy. *Acta Horticulturae*, nº 533: 249-255.

De Liñán, C. 2002. *Vademecum de Productos Fitosanitarios y Nutricionales.* 18ª Ed. Agrotecnicas S.L. Madrid. pp. 196-275.

Eurostat. 2001. Agricultural Statistics. *Quarterly Bulletin nº 4. European Commission.* Theme 5. Agriculture and Fisheries, 25.

Forcella, F. 2000. Rotary hoeing substitutes for two-thirds rate of soil-applied herbicide. *Weed Tech.* 14: 298-303

García-Torres, L. 1993. *Biología y Control de Especies Parásitas.* ed. Agrícola Española S.A. Madrid. pp. 94.

Kempen, H.M. 1989. *Weed management in vegetable crops. Growers Weed Management Guide.* Thomson Publication. Fresno, Ca., USA, pp. 82-158.

Laber H., Stutzel, H., Haas, H.U. & Hurle, K. 2000. Side effects of mechanical weed control in vegetable production. *Proc. 20th German Conference on Weed Biology and Control.* Stuttgart-Hohenheim, Germany. 17: 653-660.

Labrada, R. 1996. Manejo de malezas en hortalizas. *In* Labrada, R., Caseley, J.C., Parker, C. *Manejo de malezas para países en desarrollo.* Estudio FAO Producción y Protección Vegetal 120. FAO, Roma. pp. 298-308.

Medina, A. 1995. *Estudio de la flora arvense y su competencia en los cultivos de transplantee y siembra directa de pimiento* (*Capsicum annuum* L.), pp. 209.Escuela T.S. de Ingeniería Agraria. Univ. de Lérida, Spain. (Ph.D. thesis)

Monserrat, A. 2001. Conclusiones de las experiencias sobre solarización/biofumigación en el control de hierbas. *XX Reunión del Grupo de Trabajo de Malas Hierbas y Herbicidas.*

Consejería de Agricultura. Junta de Andalucía. Scio. de Sanidad Vegetal. Jerez, Spain. pp. 117-120.

Nogueroles-Andreu, C. & Zaragoza, C. 1999. Buenas prácticas para el control de malas hierbas en agricultura ecológica. *In* Fernández-Quintanilla, C., Garrido, M., Zaragoza, C. eds., *Control Integrado de las Malas Hierbas. Phytoma-España*. C. S. Jacinto, 1. Valencia, Spain. pp. 185-206.

Tei, F., Baumann, D.T., Dobrzanski, A., Giovinazzo, R., Kleifeld, Y., Roche, F., Rzozi, S.B., Sanseovic, T. & Zaragoza, C. 1999. *Weeds and Weed Management in Tomato. A review.* 11th European Weed Research Society Symposium, Basel, Switzerland. 132 pp.

Tei, F., Baumann, D.T., Bleeker, P., Dobrzanski, A., Economou, G., Fogelberg, F., Froud-Williams, R., Hoek, H., Melander, B., Rocha, F., Ruuttunen, P., Rzozi, S.B., Sanseovic T., Simonzic, A., Torma, M., Uygur, F., Van der Weide, R., Verschwele, A., Villeneuve F. & Zaragoza, C. 2002. *Weeds and Weed Managements in Carrots. A review.* 12th European Weed Research Symposium, Wageningen (The Netherlands) (in press).

Webster, T. M. 2002. *Nutsedge (Cyperus* spp.*) Management in Cucurbits.* (available at http://www.epa.gov/ozone/mbr/almet00/64webster).

William, R.D., Ball, D., Miller, T.L., Parker, R., Yenish, J.P., Miller, T.W., Morishita, D.W. & Hutchinson, P. 2000. Weed management in vegetable crops. *Pacific Northwest Weed Control Handbook.* Extension Services of Oregon St. Univ., Washington State Univ. and Univ. of Idaho. USA. pp. 244-274.
(also available at http://weeds.ippc.orst.edu/pnw/weeds).

Zaragoza, C., Branthome, X., Portugal, J.M., Pardo, A., Suso, M., Rodríguez, A., Monserrat A., Tiebas, A., Fernández, S. & Gutierrez, M. 1994. *Itineraires techniques compares pour le controle des mauvaises herbes chez la tomate en differentes regions europeennes.* 5th EWRS Mediterranean Symposium. Perugia, Italy. pp. 179-186.

Zaragoza, C. 2001. Uso de herbicidas en cultivos hortícolas. *En Uso de Herbicidas en la Agricultura del Siglo XXI,* editado por De Prado, R. & Jarrín, J., Cap.15. Servicio de Publicaciones. Universidad de Córdoba, Spain. pp.169-182.

Progrès dans la gestion de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*)

Maricela Martínez Jiménez

INTRODUCTION

Le Brésil est l'origine la plus probable de la jacinthe d'eau, *Eichhornia crassipes*, (C. Martius) Solmn-Laubach, avec une extension naturelle dans les autres zones sur le continent Sud Américain du. La beauté de sa fleur a mené à l'introduction de la plante dans d'autres pays tropicaux comme une plante décorative (Barret et Forno, 1982), et finalement sa conversion en une mauvaise herbe en réponse au niveau élevé de substances nutritives dans les eaux urbaines, industrielles et municipales.

L'expérience internationale (Harley, 1990; Gutiérrez *et al.* 1994;) montre que la capacité reproductive de la plante, la faculté d'adaptation, les exigences nutritionnelles et la résistance aux environnements adverses rendent impossible son éradication, et son contrôle difficile. Un assortiment de méthodes a été essayé pour infléchir la croissance de la mauvaise herbe. Les herbicides ont été le plus souvent utilisés, parce qu'ils fournissent un outil d'action immédiate, bien qu'ils soient coûteux et peuvent avoir des effets toxiques s'ils ne sont pas appliqués selon les instructions des fabricants. Cependant, dans les infestations sévères, des techniques de couverture maximale sont nécessaires, tels que les herbicides et le contrôle mécanique pour réduire l'infestation. Les autres moyens peuvent être utilisés alors, et à cet égard l'inclusion d'agents de contrôle biologique complétera en son temps les méthodes actuelles de contrôle de la jacinthe d'eau, assurant une gestion durable de la mauvaise herbe. L'utilisation d'une gestion intégrée de la jacinthe d'eau (appliquée à temps, techniques adéquates) et la mise en œuvre d'un programme de contrôle d'entretien assureront la réduction des niveaux d'infestation. Ce chapitre décrit les principaux progrès enregistrés dans le contrôle de cette mauvaise herbe.

CONTROLE CHIMIQUE

Dans le cas d'infestation sévère, les herbicides aquatiques sont une technique rapide et efficace pour gérer la jacinthe d'eau. Il y a trois herbicides aquatiques plus communément utilisés: 2,4-D (2,4-dichlorophenoxy), Diquat (6,7-dihydrodipyridol [1,2 α: 2',1'-c] le pyrazinediumion) et le glyphosate (sel isopropylamine de N-phosphonomethyl glycine). Pour leur usage, l'approbation des agences de protection des plantes est nécessaire, et doivent être appliqués strictement par des techniciens entraînés.

La formulation de 2,4-D comprend l'ester granulaire (butoxyathylester: BEE) pour l'usage sur les mauvaises herbes submergées et le dimethylamine liquide (DMA) pour les émergentes telle que la jacinthe d'eau. Le 2,4-D est un herbicide systémique; il est facilement transmis du feuillage aux racines. Il inhibe la division cellulaire des nouveaux tissus et stimule la division cellulaire entraînant l'inhibition de la croissance, des nécroses du bourgeon apical de croissance et éventuellement, le dysfonctionnement de toute la cellule et finalement la mort de la plante. Le contrôle est effectué approximativement deux semaines plus tard.

Les formulations de diquat, pour usage sur les mauvaises herbes macrophytes aquatiques, sont les sels de bromure liquides. Le diquat est rapidement absorbé par le feuillage (1–2 heures) causant une rapide inactivation des cellules et des fonctions cellulaires par l'émission d'oxidants.

Le glyphosate est un herbicide systémique non-sélectif, facilement absorbé par les feuilles et à travers le symplast. Toutes les plantes peuvent être éliminées après trois semaines (Gutiérrez *et al.* 1996). Le glyphosate a une toxicité faible et une décomposition rapide dans l'eau.

Les applications d'herbicide sont d'habitude moins coûteuses que le contrôle mécanique, mais peuvent devoir être répétées sur une base annuelle du fait que, une fois les plantes enlevées, pénétration de la lumière augmente, favorisant le germination des semences de la jacinthe d'eau et donc une nouvelle réinfestation par la jacinthe d'eau. En plus, la santé humaine et la qualité de l'écosystème doivent être prises en compte quand les herbicides aquatiques sont appliqués aux sources d'approvisionnement en eau, particulièrement l'eau de boisson. De cette façon, le problème principal est l'usage d'un agent mouillant et un pénétrant nécessaires pour augmenter l'efficacité des herbicides.

CONTROLE MECANIQUE

Le contrôle mécanique en utilisant un couperet ou un fendeur n'est pas recommandé, parce que la fragmentation peut accélérer la dissémination des plantes et, en conséquence, aggraver le problème. Les ramasseurs mécaniques peuvent enlever les plantes et empêcher la repousse. Il y a plusieurs fabricants d'équipement pour le ramassage des plantes aquatiques, mais la conception du model est la même: des couteaux qui tournent, un collecteur de végétation et un convoyeur vers la rive. Le coût (60 000–200 000 $ US) et l'efficacité sur le plan d'un ramassage très lent (les grandes moissonneuses peuvent, dans les conditions idéales, moissonner seulement 1–2 ares par jour), et le fragmentation (peut accélérer la remontée des mauvaises herbes) et l'émission d'hydrocarbures polluants (non évalué) seraient extrêmement chers, et aussi perpétuels.

LE CONTROLE BIOLOGIQUE DE LA JACINTHE D'EAU PAR LES INSECTES

Le contrôle biologique est basé sur l'usage d'ennemis naturels de la mauvaise herbe pour empêcher son développement (Deloach *et al.* 1989). Le contrôle biologique de la jacinthe d'eau a commencé dans les années 60s et a produit la stratégie classique de contrôle biologique qui implique l'importation d'ennemis naturels du lieu d'origine de la mauvaise herbe. Le contrôle biologique nécessite du temps pour l'évaluation de leur impact, mais, une fois établies, les populations restent présentes et de cette façon, le coût à long terme dans la gestion des mauvaises herbes, est moindre par rapport aux autres mesures de contrôle et moins nuisible à l'environnement.

La recherche pour l'utilisation d'agents biologiques pour le contrôle de la jacinthe d'eau inclut les arthropodes et les pathogènes. Dans le cas des arthropodes, seulement quelques insectes ont été trouvés capable de réduire significativement la croissance de la jacinthe d'eau. Parmi eux, seulement les espèces suivantes sont considérées dignes d'introduction dans d'autres pays:

- l'acarien *Orthogalumna terebrantis* Wallwork (Bennet, 1981);
- le papillon (noctuelle) *Acigona infusella* Walker (Deloach *et al.* 1980), et *Sameodes albiguttalis* (Warren) (Deloach et Cordo, 1978);
- le miride *Eccritotarsus catarinensis* Carvalho (Hill *et al.* 1999);
- les charançons *Neochetina eichhorniae* Warner et *Neochetina bruchi* Hustache (Deloach et Cordo, 1976 a, b; Center *et al.* 1982).

Ces deux dernières espèces sont les agents qui ont fourni les meilleurs résultats lorsqu'elles ont été utilisées dans un programme intégral de contrôle (Cofrancesco *et al.* 1985). Cependant, son impact a été variable. Dans quelques cas, le contrôle de la jacinthe d'eau uniquement par l'utilisation d'insectes a été rapporté avec succès (Deloach et Cordo, 1983;

Cilliers, 1991; VanThielen *et al.* 1994.). L'efficacité de ces arthropodes n'a pas été atteinte au niveau désiré de contrôle à cause des facteurs suivants:

- L'application non judicieuse d'herbicides.
- Dans le cas de *S. albiguttalis*, l'exigence en plantes jeunes et en croissance active sont un préalable pour son établissement.
- Dans le cas de *Neochetina* spp, la qualité de la plante pourrait influencer l'abondance de *Neochetina* (Center et Dray, 1992, Center et Wright, 1991); les populations de charançons augmentent lentement et donc leur densité est trop basse pour le contrôle (Perkins, 1978). En plus, ces insectes ont des cycles de vie relativement longs (66–75 jours pour *N. bruchi* et 96–120 pour *N. eichhorniae).* Le développement de la population est lent, comparée au taux de croissance rapide des plantes (une plante se reproduit chaque 7–10 jours), donc la reproduction de la plante se fait beaucoup plus rapidement, que les dommages infligés par les charançons (Martínez *et al.* 2001).
- Dans le cas de *E. catarinensis et O. terebrantis,* cet insecte a été lâché dans beaucoup moins de pays; et un peu d'impact sur la croissance de la plante a été observé (Julien et Griffith, 1998).
- Une forte incidence de maladie sur les insectes (Cordo, 1996).

En dépit des difficultés associées avec l'établissement d'insectes, la jacinthe d'eau reste un candidat pour un contrôle biologique satisfaisant, mais les considérations suivantes doivent être prises en compte:

a) prospecter sur les maladies possibles de l'insecte avant et après le lâcher;
b) vérifier sa capacité reproductive;
c) lâcher continu d'insectes ;
d) lâcher de nouveaux écotypes d'insectes;
e) comprendre les facteurs affectant la croissance des populations d'insectes, qui régulent et maintiennent les populations à des tailles réalistes.

LE CONTROLE BIOLOGIQUE DE LA JACINTHE D'EAU PAR LES PATHOGENES

A cause de la capacité reproductive et à cause de la croissance rapide de la jacinthe d'eau, il a été nécessaire d'utiliser une série d'agents de bio-contrôle pour augmenter le stress biotique afin de réduire la résurgence de population. Parmi les ennemis naturels de la jacinthe d'eau, les pathogènes des plantes peuvent être utiles parce que, comme les bio-herbicides dans un programme de contrôle intégré des mauvaises herbes, ils sont souvent spécifiques (aucun risque pour les cultures, les plantes ou les animaux locaux), ils sont faciles à propager et disséminer et se maintiennent d'eux-mêmes, réduisant ainsi la nécessité pour des applications répétées. Cependant, comme c'est le cas des autres bio-pesticides, les herbicides microbiens sont inactivés dans le milieu par exposition à la température, à une faible humidité et au rayonnement ultraviolet. En fait, le problème principal des bio-pesticides est leur production à grande échelle dans une formulation qui permette une application qui s'accompagne de succès au champ.

Parmi les pathogènes des plantes, les champignons sont les pathogènes naturels de plantes les plus importants. Beaucoup de champignons pathogènes ont été cités dans la littérature comme agents de bio-contrôle potentiels pour la jacinthe d'eau. Parmi eux, il y a *Cercospora piaropi (=C. rodmanii), Acremonium zonatum, Alternaria eichhorniae, Myrothecium roridum, Rhizoctonia solani* et *Uredo eichhorniae.*

A. eichhorniae et *C. piaropi*, ont été étudiés pour leur biologie, leur potentiel de bio-contrôle, la formulation spécifique à un l'hôte et ont été essayés dans les conditions expérimentales (Conway et Freeman, 1977; Freeman et Charudattan; 1984, Martínez et Charudattan; 1998, Martínez et Gutiérrez, 2001; Shabana, 1997; Shabana *et al.* 1997). Les résultats indiquent que les dommages produits par les champignons sont renforcés lorsqu'ils sont utilisés en combinaison avec les insectes (Charudattan, 1996; Galbraith, 1987, Martyn, 1985; Freeman et Charudattan, 1984). Cependant, aucun bio-herbicide commercial pour la jacinthe d'eau n'est disponible.

Le contrôle biologique réduit la vigueur d'une mauvaise herbe, lorsqu'il est combiné avec les conditions écologiques, la phénologie de la plante et l'usage intégré d'autres options de gestion. L'usage d'un seul agent de bio-contrôle n'assure pas en lui-même le succès du contrôle. Le bio-contrôle de la jacinthe d'eau, devrait être une partie d'un programme de contrôle intégral qui inclut des visites techniques, programmées et opportunes pour évaluer le progrès. Dans une infestation sévère, une large couverture technique (contrôle mécanique et/ou chimique) peut être nécessaire. Une fois que l'infestation a été ramenée à une taille contrôlable, les agents de bio-contrôle devraient être lâchés dans les zones sûres. Pour déterminer l'impact des agents de bio-contrôle sur la mauvaise herbe, avant et après que l'organisme a été établi, une évaluation doit être faite de la densité et de la biomasse de la plante (poids frais par unité de surface et le nombre d'individus par unité de surface). Le nombre de points d'échantillonnage est basé sur la quantité d'eau. Les paramètres qui sont évalués sont: le poids frais (kg), le nombre de plantes, le nombres de plantes-filles, le nombre de fleurs, le nombre de feuilles par plante, la taille de la plante (cm), le nombre d'insectes (adultes, larves, pupes), l'incidence et la sévérité de la maladie dans le cas de pathogènes.

PHENOLOGIE DE LA JACINTHE D'EAU COMME UNE STRATEGIE DE CONTROLE

L'identification de périodes sensibles dans le cycle de croissance de la jacinthe d'eau peut être utilisée pour la gestion de cette mauvaise herbe. Luu et Getsinger (1988) ont observé une diminution marquée dans la production de rameaux et de biomasse suite à la floraison. Pieterse *et al.* (1976) ont observé que les plantes ne fleurissant pas produisaient deux fois plus de rameaux et le double de la biomasse, comparativement aux plantes en floraison. Ce phénomène pourrait suggérer que la phase de reproductive sexuelle de la plante soit le point de contrôle dont il faut tenir compte quand une méthode de contrôle doit être appliquée.

CONCLUSIONS

Le coût entrant dans la gestion de la jacinthe d'eau dans le monde est si élevé aussi bien économiquement qu'écologiquement, que des mesures de contrôle saines pour l'environnement et économiquement durables sont nécessaires pour fournir des solutions à long terme à l'infestation des mauvaises herbes. Un programme de contrôle intégré pour la jacinthe d'eau (techniques adéquates exécutées á temps) doit être structuré selon les caractéristiques de chaque site. En plus, un programme de contrôle d'entretien doit être exécuté année après année afin de minimiser le coût de gestion des mauvaises herbes. Ceci est le problème principal dans les pays en développement où il n'y a pas de prise de conscience sur le danger que représente cette mauvaise herbe. Dans une infestation à grande échelle de la jacinthe d'eau, il sera nécessaire de réduire la couverture de la mauvaise herbe par des moyens de contrôle mécaniques et/ou chimiques, et en même temps inclure des réserves non traitées où les lâchers d'insectes et de champignons doivent être exécutés. L'objectif est de faire baisser les niveaux de populations de la jacinthe d'eau avec ces agents biologiques, et créer un niveau de stress permanent, provoquant ainsi un contrôle efficace à la longue. Dans un programme de contrôle biologique avec les pathogènes des plantes, il est premièrement nécessaire de faire une sélection de micro-organismes locaux dans la région où ils devront

être utilisés, afin d'éviter le danger potentiel que représente l'introduction de pathogènes de plantes. Finalement, il est important de citer la déclaration faite par Gopal (1987) : "les pays en développement ne devraient pas encourager la propagation de cette mauvaise herbe pour l'utilisation. Les intérêts de l'humanité peuvent être protégés seulement en cherchant un contrôle à long terme efficace de la jacinthe d'eau, plutôt que son utilisation".

BIBLIOGRAPHIE

Barret, S. C. H. & Forno, I. W. 1982. Style morph distribution in new world populations of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach (water hyacinth). *Aquatic Bot.* 13: 299-306.

Bennett, F.D. 1984. Biological control of aquatic weeds. In *Proc. Int. Conf. Water hyacinth*. Thyagarajan, G. ed. UNEP Res. & Proc. Series 7. Nairobi, Kenya. 14-40.

Center, T.D., Steward, K.K. & Bruner, C.M. 1982. Control of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) with *Neochetina eichhorniae* (Coleoptera: Curculionidae) and a growth retardant. *Weed Sci.* 30: 453-457.

Center, T. & Wright, D. 1991. Age and phytochemical composition of waterhyacint (Pontederiaceae) leaves determine their acceptability to Neochetina eichhorniae (Coleoptera: Curculionidae). *Environ. Entomol.* 20 (1) 323-334

Center, T.D. & Dray, F.A. 1992. Associations between water hyacinth weevils *Neochetina eichhorniae* and *N. bruchi* and phenological stages of *Eichhornia crassipes* in Southern Florida. *Florida Entomol.* 75 (2): 196-211.

Cofrancesco, A. F., Steward, M. & Sanders, D.R. 1985. The impact of *Neochetina eichhorniae* (Coleoptera: Curculionidae) on water hyacinth in Louisiana. *Proc. VIth Int. Symp. Biol. Contr. Weeds*. Vancouver, Canada. ed. Delfosse, E. E. *Agric. Can.* pp. 525-535.

Cordo, H.A. 1996. Recomendations for finding and prioritizing new agents for biocontrol of water hyacinth. *In* Charudattan, R., Labrada, R., Center, T.D. & Kelly-Begazo, C., eds. *Strategies for Water hyacinth Control.* Report of a panel of experts meeting, 11-14 September, 1995, Fort Lauderdale, Florida. FAO, Rome, pp. 181-188.

Cilliers, C. J. 1991. Biological control of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) in South Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 37: 207-217.

Conway, K.E. & Freeman, T.E. 1977. Host specificity of *Cercospora rodmanii* a potential biological control of waterhyacinth. *Plante Dis. Rptr.* 61: 262-266.

Charudattan, R. 1986. *Cercospora rodmannii*: a biological control agent for water hyacinth. *Aquatics* 8 (2): 21-24.

Charudattan, R. 1996. Pathogens for biological control of water hyacinth. *In* Charudattan, R.,Labrada, R., Center, T.D. and C. Kelly-Begazo, eds. *Strategies for water hyacinth control.* Report of a Panel of Experts Meeting, 11-14 September, 1995. Fort Lauderdale, Florida USA. FAO, Rome, pp. 90-97.

Deloach, C. J. & Cordo, H.A. 1976a. Ecological studies of *Neochetina bruchi* and *Neochetina eichhorniae* on water hyacinth in Argentina. *J. Aquat. Plante Management* 14: 53-59.

Deloach, C. J. & Cordo, H.A. 1976b. Life cycle and biology of *Neochetina bruchi* a weevil attacking water hyacinth in Argentina, with notes on *Neochetina eichhorniae. Annals Entomol. Soc. America,* 69 (4): 643-652.

Deloach, C. J. & Cordo, H. A. 1978. Life history and ecology of the moth *Sameodes albiguttalis,* a candidate for the biological control of water hyacinth. *Environ. Entomol.* 7 (2): 309-321.

Deloach, C. J., Cordo, H. A., Ferrer, R. &. Runnacles, J. 1980. *Acigona infusella*, a potential biological control agent for water hyacinth: observations in Argentina (with a description of two new species of *Apanteles* by L. de Santis). *Annals Entomol. Soc America* 73: 138-146.

Deloach, C. J. & Cordo, H.A. 1983. Control of water hyacinth by *Neochetina bruchi* (Coleoptera: Curculionidae: Bagoini) in Argentina. *Environmental Entomology.* 12. 19-23

Deloach, C. J., Cordo, H.A. & Crouzel, I.S. 1989. *Control Biológico de Malezas.* ed. El Ateneo, Buenos Aires, Argentina. 266 pp.

Freeman, T.E. & Charudattan, R. 1984. *Cercospora rodmanii* Conway, a potential biocontrol agent for water hyacinth. *Florida Agricultural Experimental Station Technical Bull.* 842, 17 pp. Institute of Food and Agriculture Science, Gainesville, Florida.

Galbraith, J.C. 1987. The pathogenicity of an Australian isolate of *Acremonium zonatum* to water hyacinth, and its relationship with the biological control agent *Neochetina eichhorniae. Aust. J. Agri. Res.* 9 (29): 19-229.

Gopal, B. 1987. *Water Hyacinth, Aquatic Plante.* Elsevier Science Publishers, B. V. Amsterdam, The Netherlands. 471 pp.

Gutiérrez, E., Arreguín, F., Huerto, R. & Saldaña, P. 1994. Aquatic weed control. *Int. J. Water Resources Development 10: 291-312*

Gutiérrez López, E., Huerto Delgadillo, R. & Martínez Jiménez, M. 1996. Waterhyacinth problems in Mexico and practiced methods for control. *In* Charudattan, R., Labrada, R. Center, T.D. & Kelly-Begazo., C. eds. *Strategies for Water hyacinth Control* Report of a Panel of Experts Meeting, 11-14 September, 1995. Fort Lauderdale, Florida USA. FAO, Rome, pp. 125-135

Harley, K.L.S. 1990. The role of biocontrol control in the management of water hyacinth, *Eichhornia crassipes. Biocontrol News and Information* 11(1): 11-22

Hill, M.P., Cilliers, C.J. & Nesser, S. 1999. Life history and laboratory host range of *Eccritotarsus catarinensis* (Heteroptera: Miridae), a new natural enemy released on waterhyacinth (Eicchornia crassipes (Mart.) Solms-Laub.) (Pontederiaceae) in South Africa.
Biological Control 14: 127-133.

Julien, M.H. & Griffiths, M. 1998. *Biological control of weeds. A world catalogue of agents and their target weeds.* Fourth edition. Wallingford, CAB International, 223 ppp.

Luu Kien, T. & Getsinger, K.D. 1988. *Control points in the growth cycle of water hyacinth.* Aquatic Plante Control Research Programme. US Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.

Martyn, R.D. 1985. Water hyacinth decline in Texas caused by Cercospora rodmanii.*Aquatic Plante Management* 23: 29-32.

Martínez Jiménez, M. & R. Charudattan. 1998. Survey and evaluation of Mexican native fungi for potential biocontrol of water hyacinth. *J. Aquat. Plante Management.* 36: 145-148.

Martínez Jiménez, M. & Gutiérrez López, E. 2001. Host range of *Cercospora piaropi* and *Acremonium zonatum*, potential fungal biocontrol agents for water hyacinth in México. *Phytoparasitica 29* (2): 175-177

Martínez Jiménez, M., Gutiérrez López, E., Huerto Delgadillo, R. & Franco Ruiz E. 2001. Importation, rearing, release and establishment of *Neochetina bruchi* (Coleoptera Curculionidae) for the Biological Control of water hyacinth in Mexico. *J. Aquat. Plante Management* 39: 1

Perkins, B.D. 1978. Enhancement of effect of Neochetina eichhorniae for biological control of water hyacinth. *Proc. 4th Int. Conf. Biol. Control of weeds.* Gainesville, Florida.(ed. Freeman, T.E.) 87-92

Pieterse, A.H., Aris, J.J.A.M. & Butter, M.E. 1976. Inhibition of float formation in water hyacinth of gibberellic acid. *Nature*: Vol 266, 423-424

Shababa Y.M. 1997. Formulation of *Alternaria eichhorniae*, a mycoherbidide for water hyacinth, in invert emulsions averts dew dependence. *J. Plante Disease and Protection*: 104 (3) 231-238.

Shababa, Y.M., Zakaria, Baka, A.M. & Gamal, M. Abdel-Fattah. 1997. *Alternaria eichhorniae*, a biological control agent for water hyacinth: mycoherbicidal formulation and

physiological and ultra-structural host responses. *European J. Plante Pathology* 103: 99-111.

Van Thielen, R., Ajounou, O., Shade, V., Neuenschwander, O., Aditä, A. & Lomer, C.J. 1994. Importation, release and establishment of *Neochetina* spp. (Coleoptera: Curculionidae) for the biological control of water hyacinth *Eichhornia crassipes* (Lil.: Pontederiaceae), in Benin, West Africa. *Enthomophaga 39*: 179-188.

Chapitre 3

Options de gestions et perspectives

Principes et pratiques d'utilisation des plantes de couverture dans un système de gestion des mauvaises herbes

John. R. Teasdale

INTRODUCTION

Les plantes de couverture sont des espèces de plantes qui sont introduites dans les rotations des cultures pour produire un effet bénéfique à l'agro-ecosystème. Quelques effets environnementaux produits par les plantes de couverture comprennent : la protection des sols contre l'érosion, la capture et la prévention des pertes d'éléments nutritifs, la fixation de l'azote par les légumineuses, l'augmentation du carbone du sol et les améliorations des caractéristiques physiques et chimiques du sol qui lui sont associées, la diminution de la température du sol, l'augmentation de la diversité biologique y compris les organismes bénéfiques et la suppression des mauvaises herbes et des insectes nuisibles (Sustainable Agriculture Network, 1998). Ce chapitre concerne la suppression des mauvaises herbes par les plantes de couverture, mais l'accent sera mis dans la conclusion sur la nécessité de gérer les plantes de couverture afin d'optimaliser l'ensemble des impacts sur l'écosystème.

Les plantes de couverture peuvent être regroupées en deux catégories : 1) les plantes annuelles qui sont cultivées en dehors de la saison culturale et qui sont éliminées avant la plantation des cultures de rente ; et 2) le paillis vivant qui pousse au même moment que la culture de rente pendant tout ou partie de la campagne agricole. Les plantes de couverture qui sont éliminées avant l'implantation de la culture de rente influencent le contrôle des mauvaises herbes premièrement à travers l'influence de leurs résidus sur la germination des mauvaises herbes et leur installation. Des exemples de ces types de plantes de couverture sont *Vicia villosa* Roth, une légumineuse annuelle d'hiver et *Secale cereale* L. une céréale annuelle d'hiver, qui sont aptes à pousser pendant la saison froide en climat tempéré et qui sont détruites avant la plantation des cultures de rentes quand les températures deviennent plus chaudes. Des exemples de plantes de couvertures qui sont adaptées aux périodes chaudes de jachère en été dans les climats tropicaux et subtropicaux incluent les légumineuses annuelles comme *Mucuna* spp. et *Crotalaria juncea* L.; ou les graminées annuelles de saisons sèche tel que *Sorghum* spp.

CONTROLE DES MAUVAISES HERBES PAR LES RESIDUS DES PLANTES DE COUVERTURE

Les plantes de couvertures annuelles sont souvent détruites avant la mise en place des cultures de rente. Ceci peut être fait par l'incorporation des résidus de la plante de couverture dans le sol ou en tuant la plante de couverture par voie mécanique ou chimique tout en laissant le paillis à la surface du sol.

Les résidus incorporés

Il a été montré que le labour stimule la germination des mauvaises herbes et l'émergence de plusieurs semences de mauvaises herbes par une brève exposition à la lumière solaire (Ballar *et al.* 1992). Lorsque le labour est utilisé pour l'incorporation de résidus, plusieurs semences de mauvaises herbes seront stimulées pour la germination par cette opération. Ainsi, en incorporant les résidus par le labour, des stratégies de gestion des mauvaises herbes doivent être disponibles pour contrôler l'augmentation de la charge potentielle des jeunes pousses de mauvaises herbes.

Les résidus de plantes incorporés peuvent être toxiques aux mauvaises herbes par la libération de substances chimiques allélopathiques. Il existe un nombre important de travaux sur l'allélopathie et l'isolement de composés allélopathiques des plantes (Inderjit et Keating, 1999). Cependant, ce phénomène peut ne pas se manifester constamment en conditions naturelles car le potentiel

allélopathique des plantes dépend de plusieurs facteurs dont l'âge de la plante, les propriétés du sol, et les conditions environnementales. Les interactions de stress multiples dans l'environnement de ces plantes peuvent aussi affecter le degré de l'activité allélopathique (Einhelig, 1996). Des Exemples de quelques contrôles de mauvaises herbes conduisant à l'accroissement du rendement après l'incorporation de résidus de plantes de couverture comprennent l'incorporation des chaumes de *Sorghum bicolor* L. avant *Triticum aestivum* L. (Cheema et Khaliq, 2000), incorporation de *Brassica napus* L. avant *Solanum tuberosum* L. (Boydston et Hang, 1995) et incorporation de *Trifolium incarnatum* L. avant *Zea mays* L. (Dyck et al. 1995).

Tout comme avec l'utilisation d'herbicides pour contrôler les mauvaises herbes, il faut une grande sélectivité des toxines des plantes de couverture sur les mauvaises herbes et sur les cultures. Pour être utile comme pratique de contrôle des mauvaises herbes, la culture doit être relativement insensible aux allélochimiques dans l'environnement. Les cultures à petites graines pourraient être plus sensibles aux substances allélochimiques que celles à grosses graines. La sélection des cultivars et la gestion appropriée de résidus peuvent être déterminants pour maximiser l'activité allélopatique sur les mauvaises herbes et minimiser les effets délétères sur les cultures, y compris l'autotoxicité. La programmation et le positionnement des résidus par rapport aux semences des cultures peuvent être manipulés pour réduire le niveau de toxicité auxquels sont exposées les plantules émergentes de la culture.

Les résidus de surface

Quand les plantes de couvertures sont éliminées et les résidus sont laissés à la surface du sol dans un système cultural sans labour, plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'élimination des mauvaises herbes (Teasdale 1998, Liebman et Mohler, 2001). L'absence du labour diminue l'émergence des mauvaises herbes étant donné que les semences qui ont besoin d'une brève exposition à la lumière au cours des opérations de labour ne sont pas induites à la germination. En plus, les résidus à la surface du sol peuvent supprimer directement l'émergence des mauvaises herbes. Le degré de contrôle des mauvaises herbes fourni par les résidus des plantes de couverture à la surface du sol peut varier suivant l'espèce de plante de couverture, la biomasse du résidu et les espèces de mauvaises herbes. La suppression des mauvaises herbes par les résidus de culture augmente suivant une fonction exponentielle négative avec l'augmentation de la biomasse des résidus. Le niveau des résidus naturellement produits par les plantes de couverture peut réduire l'émergence des mauvaises herbes jusqu'à concurrence de 90%. Les espèces annuelles à petites graines, et qui ont besoin de lumière pour la germination sont les plus sensibles aux résidus de surface, alors que les espèces annuelles à grosses graines et les espèces pérennes sont relativement insensibles. La suppression des mauvaises herbes va décroître tout au long de la saison avec la décomposition des résidus.

Les résidus à la surface du sol peuvent varier largement en dimension, structure, mode de distribution et en hétérogénéité spatiale. Plusieurs propriétés physiques des paillis ont été étudiées et peuvent contribuer à la suppression des mauvaises herbes par des impédances physiques sur l'émergence des mauvaises herbes (Teasdale et Mohler, 2000). L'indice de surface de paillis est une propriété principale pour la définition de plusieurs propriétés importantes du paillis. Il est défini comme l'aire projetée du matériel de paillis par unité de surface de sol et peut être déterminé en multipliant la masse de résidus par unité de surface par le ratio surface - masse mesuré à partir d'un sous-échantillonnage de résidus. La 'fraction de volume solide' est une autre caractéristique importante du paillis qui est définie comme la fraction de volume de paillis composé de matériel solide. Ensemble, ces deux indices peuvent prédire la suppression des mauvaises herbes par une large gamme de paillis variant des tiges de maïs qui a un faible ratio surface - masse aux feuilles de *Quercus* avec un ratio surface-masse élevé. Ceci suggère qu'un résidu à plusieurs couches de litière et très peu d'espace vide interne sera le plus efficace pour la suppression des mauvaises herbes.

Les résidus influencent aussi le microclimat du sol par l'interception des radiations incidentes (Teasdale et Mohler, 1993). L'interception et la réflexion des radiations à ondes courtes par les résidus réduisent la quantité de lumière disponible à la surface du sol, la chaleur absorbée par les sols pendant la journée, et la quantité d'eau évaporée des sols. Ces effets peuvent interagir avec les exigences de germination des semences pour déterminer le type d'émergence de plantules de mauvaises herbes observées pour une saison donnée.

L'extinction de la lumière par les paillis des plantes de couverture suit également une fonction exponentielle négative en relation avec la surface occupée par le paillis, comme l'extinction de la lumière par la voûte d'une plante décroît en fonction de la surface foliaire. Etant donné que la masse de paillis est linéairement dépendante de la surface couverte par le paillis, une relation exponentielle similaire existe entre l'extinction de la lumière et la masse de paillis. Plusieurs espèces de mauvaises herbes ont besoin avant émergence de lumière pour activer le processus de germination par la médiation du phytochrome. Les mauvaises herbes qui émergent ont également besoin de lumière pour l'initiation de la photosynthèse avant l'épuisement des réserves des semences. L'extinction de la lumière par les résidus peut être un important facteur d'inhibition de l'émergence des mauvaises herbes à travers les résidus.

Les résidus des plantes de couverture à la surface du sol peuvent réduire la température maximum du sol de 2 - 5°C et élever la température minimum d'environ 1°C en climats tempérés bien que ceci peut varier suivant l'intensité de la radiation, l'humidité du sol et le type de sol. Des écarts plus forts pourront probablement être observés en climat tropical ou dans les zones plus sèches du monde. La plupart des semences des mauvaises herbes germeront dans une large gamme de températures et, pour cela la réduction de la température maximum du sol par les résidus aura souvent une influence faible sur la germination. A cause de la diminution de la température maximum et de l'augmentation de la température minimum du sol, l'amplitude journalière de la température du sol est également réduite par les résidus. Des amplitudes thermiques fortes sont nécessaires pour lever la dormance de quelques espèces de mauvaises herbes et, pour cela une réduction de l'amplitude de température du sol par les résidus des plantes de couverture peut empêcher la germination des espèces de mauvaises herbes qui ont cette exigence.

Les résidus à la surface du sol augmentent l'humidité du sol en augmentant l'infiltration des eaux de pluies et en diminuant les pertes d'eau par évaporation. Une forte humidité du sol sous couvert de résidus de plantes de couverture peut être bénéfique ou retarder la germination des mauvaises herbes en fonction des besoins des espèces. En conditions de saturation du sol, les résidus peuvent ralentir l'évaporation et réduire la germination des espèces qui sont inhibées par une humidité excessive du sol. En condition de sécheresse, la rétention de l'humidité du sol peut permettre une germination des mauvaises herbes et la survie des plantules.

Les résidus dans la plupart des champs auront une distribution spatiale relativement hétérogène. Ceci peut être dû à une distribution inégale des plantes de couvertures à travers le champ, impliquant ainsi des zones à forte et à faibles concentrations de résidus après dessiccation des plantes de couvertures. Même si la répartition des plantes de couvertures est relativement uniforme, des inégalités dans la répartition des résidus peuvent être détectées au niveau de quelques microsites. Par exemple, plus de 50 % des sites mesurés sous un paillis apparemment uniforme de *Vicia villosa* ont transmis plus de 10 % de lumière au niveau du sol (Teasdale et Mohler, 1993). Ceci peut être expliqué par la relation exponentielle entre la couverture du sol et l'indice de surface du paillis (Teasdale et Mohler, 2000). En supposant une distribution aléatoire du paillis, on aura besoin de plus en plus de paillis pour permettre l'augmentation de la quantité de paillis sur chaque unité de surface. Par exemple, il faudrait une augmentation de l'indice de surface de paillis de 1.4 - 1.9 (=0.5) pour augmenter la couverture du sol de 75 à 85 % mais il faut une augmentation de 1.9-3.0 (=1.1) pour augmenter la couverture du sol de 85-95 %. Même

un indice de surface de paillis relativement élevé de 4 laissera 2 % de sol nu. Ainsi, les résidus de plantes de couverture couvrent rarement complètement le sol et ne peuvent garantir ni un contrôle total des mauvaises herbes ni un contrôle pendant toute la campagne. Les plantes de couverture peuvent contribuer au contrôle des mauvaises herbes, mais les herbicides ou autres tactiques de contrôle sont nécessaires pour optimiser le contrôle des mauvaises herbes et le rendement des cultures.

Chaque stratégie de contrôle des mauvaises herbes y compris les plantes de couverture exerce une pression sélective sur la population des mauvaises herbes et sélectionnera les espèces les plus adaptées à ce système. Les pérennes et les mauvaises herbes annuelles à grosses graines qui ont des besoins minima pour lever la dormance des semences et suffisamment de réserves d'énergie pour pénétrer la litière seront vraisemblablement plus aptes à s'établir et à se reproduire dans des paillis de plantes de couverture. Aussi, les espèces qui ont une phénologie similaire à la plante de couverture mais qui peuvent survivre au système de gestion des plantes de couverture deviendront problématiques. Par exemple, nous avons observé que *Lolium multiflorum* Lam. peut s'établir avec la plante de couverture *V. villosa* ou *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. peut s'établir avec *Glycine max* (L.) Merr. semé en plante de couverture au printemps et les deux espèces peuvent repousser et se reproduire après que la plante de couverture est fauchée en préparation à la plantation d'une culture de rente. Ainsi, les plantes de couverture doivent être utilisées dans des rotations qui empêchent la reconstitution des espèces adaptées au système.

Applications pratiques

Les plantes de couverture qui produisent des quantités élevées de biomasse pourront accroître la suppression des mauvaises herbes en laissant des quantités élevées de résidus

Les espèces vigoureuses qui sont bien adaptées et plantées à des dates de plantation optimales seront plus utiles. Par exemple, *Vigna unguculata* (L.) Walp. est adaptée aux conditions chaudes et sèches et a produit 8.2 -9.6 Mg/ha de résidus en tant que plante de couverture qui supprime efficacement les mauvaises herbes dans un climat désertique (Hutchinson et McGiffen, 2000). Des mélanges de plantes de couverture qui ont besoin de ressources complémentaires est une autre approche pour augmenter la biomasse des plantes de couverture. Souvent, une combinaison de graminées et de légumineuses est un mélange efficace de plantes de couverture pour les mêmes raisons qui font d'elles des partenaires efficaces en association de culture. Une polyculture de *V. villosa* plus *T. incarnatum* plus *S. cereale* a produit une quantité de biomasse plus élevée et a supprimé les mauvaises herbes plus que chaque espèce en monoculture (Teasdale et Abdul-Baki, 1998).

Les résidus de plantes de couverture qui se décomposent lentement prolongeront la période d'élimination des mauvaises herbes

Une décomposition lente est associée à un résidu qui a un ratio C/N élevé. Par exemple, les résidus de *S. cereale* qui ont un rapport de C/N plus élevé que la légumineuse *V. villosa* ont une période de suppression des mauvaises herbes plus longue que *V. villosa* (Mohler et Teasdale, 1993). Aussi, les équipements comme les faucheuses qui râpent les résidus peuvent accroître la décomposition contrairement aux équipements comme les rouleaux qui gardent les résidus intacts.

De faibles quantités de résidus peuvent stimuler l'émergence des mauvaises herbes

Parfois, plus de mauvaises herbes émergeront en condition de faible niveau de résidu de plantes de couverture (1-2 mg/ha) que dans des parcelles de contrôle non couvertes (Mohler et Teasdale, 1993; Teasdale et Mohler, 2000). De faibles niveaux de résidus ne suffisent pas pour inhiber l'émergence des mauvaises herbes mais peuvent créer un environnement plus favorable pour leur

germination et leur émergence. Ces résidus peuvent retarder l'évaporation de l'eau du sol et fournir des conditions d'humidité plus uniformes pour la germination et l'émergence, que sur les sols nus. Aussi, les composés azotés libérés dans la zone de germination, particulièrement des légumineuses de couverture, peuvent stimuler la germination d'espèces sélectionnées de mauvaises herbes.

Création de paillis avec plusieurs couches de matériel densément comprimés

Puisque l'indice de surface de paillis et la fraction solide de volume sont des déterminants importants de la suppression des mauvaises herbes, les pratiques de gestion qui créent le maximum de surface de paillis et de volume solide ou, inversement, qui minimisent les volumes vides de paillis, maximiseront la suppression des mauvaises herbes. Le paillis composé de matériel de feuilles de dicotylédones dans une matrice de tiges de graminées comme on peut obtenir d'une couverture faite de légumineuse et de graminées pourrait être plus efficace qu'un paillis composé seulement de tiges ou de feuilles. Aussi, l'utilisation d'instruments comme les rouleaux ou les couperets qui pendant le processus de dessiccation mettent en paquets où compriment le paillis peuvent maximiser le potentiel suppressif des paillis des plantes de couverture. L'utilisation de plantes de couverture susceptibles de fournir une densité uniforme et minimiser les espaces vides est recommandée. Ceci pourra maximiser les aires avec une quantité optimale de résidus et minimiser les aires à niveaux de résidus inefficaces ou stimulateurs de germination des mauvaises herbes.

LES PAILLIS VIVANTS

Les paillis vivants sont des plantes cultivées ensemble avec une culture de rente. Elles ne sont pas souvent cultivées pour être récoltées ou pour un profit direct, mais plutôt pour des intérêts écologiques incluant la protection des sols contre l'érosion, l'amélioration de la fertilité du sol, la création de parcours, la suppression des mauvaises herbes et la réduction de la population des ravageurs (Hartwig et Ammon, 2002). Les légumineuses à croissance lente et les graminées sont typiquement utilisées à cette fin. Les espèces de fourrage et de gazons sont souvent utilisées comme paillis vivants car leur croissance est souvent plus lente que celle de la plupart des cultures Et elles s'établissent facilement et sont faciles à gérer. Les légumineuses sont souvent introduites dans les systèmes de culture là où l'amélioration de la qualité et de la fertilité du sol constituent une priorité alors que les graminées sont souvent introduites là où la durabilité et l'aptitude au trafic sont importantes. Les paillis vivants, comme *V. unguiculata* ou *Mucuna* spp., peuvent aussi produire des parties consommables qui peuvent compléter les revenus générés des cultures principales auxquelles elles sont associées.

Les paillis vivants peuvent protéger les cultures en formant une barrière aux mauvaises herbes et autres organismes pathogènes provenant du sol. Ils produisent aussi une plus grande diversité de communautés qui peuvent réduire le niveau des insectes ravageurs par l'attraction des ennemis naturels des ravageurs ou en créant un environnement plus difficile d'accès aux ravageurs. La contrainte majeure de l'utilisation des paillis vivants est la compétition pour l'eau et les éléments nutritifs, ce qui conduit à une réduction du rendement. Des approches créatives de gestion doivent être instaurées pour soulager l'effet détrimental des paillis vivants sur les cultures tout en maximisant le bénéfice en terme de gestion des mauvaises herbes et des ravageurs.

Suppression des mauvaises herbes par les paillis vivants et problème de sélectivité

Parce que les mauvaises herbes et les paillis vivants entrent en compétition pour les mêmes ressources, les mauvaises herbes peuvent être supprimées par l'introduction de paillis vivant dans les systèmes de cultures. Si une plante de couverture s'établit avant l'émergence des mauvaises herbes, alors, la présence de végétation verte couvrant le sol crée un environnement de radiation qui n'est pas favorable à la germination, à l'émergence et à la croissance des mauvaises herbes.

Plusieurs exigences pour lever la dormance et enclencher la germination des mauvaises herbes dans les sols (lumière caractérisée par un rapport rouge/infrarouge et une forte amplitude thermique journalière du sol) sont plus réduites par les paillis vivants que par les résidus desséchés (Teasdale et Daughtry, 1993). Une fois établi, les paillis vivants peuvent aussi utiliser la lumière, l'eau, et les éléments nutritifs qui autrement seraient disponibles pour les mauvaises herbes. L'allélopathie est un autre mécanisme par lequel les paillis vivants sont susceptibles de supprimer les mauvaises herbes (Fujii, 1999). Cependant il est difficile de la séparer expérimentalement des mécanismes de compétition pour les ressources de croissance. Les mauvaises herbes peuvent échapper à leur destruction par les paillis vivants à travers les vides dans la végétation de paillis, par leurs capacités morphologiques et physiologiques pour accéder aux ressources malgré la présence d'un paillis vivant compétitif, ou par des systèmes d'émergence ou de croissance qui évitent les périodes les plus compétitives de croissance des paillis vivants.

Les plantes de couverture qui poussent en l'absence des cultures dans une rotation peuvent aider, à maintenir la couverture du sol et à occuper une niche qui autrement serait occupée par les mauvaises herbes. Par exemple, les plantes de couverture cultivées en automne fournissent une couverture qui protège le sol contre l'érosion et supprime les mauvaises herbes pendant la jachère d'été dans les prairies canadiennes (Moyer et *al.* 2000). En plus, les plantes de couverture plantées en automne peuvent devenir l'année suivante du paillis vivant pour une culture plantée en relais à la plante de couverture. Enache et Ilnicki (1990) ont développé un système où *Trifolium subterraneum* L. était initialement planté en automne et avait produit une couverture dense avec une végétation basse qui est restée vivante jusqu'à la sénescence naturelle plusieurs semaines après que le maïs est semé en relais au printemps. Ce paillis a continué à supprimer les mauvaises herbes au cours du reste de la saison jusqu'à ce que des repousses de *T. subterraneum* émergent en automne et établissent une culture de couverte qui revient naturellement sur la parcelle. La biomasse des mauvaises herbes a été réduite de 53 à94 % par ce paillis vivant alors que la biomasse des mauvaises herbes dans les paillis desséchés de *S. cereale* chute d'environ 11% comparativement aux 76% d'augmentation obtenus sur les parcelles contrôle non assujetties au paillis. De la même façon, la biomasse des mauvaises herbes était réduite de 52à 70 % dans *V. villosa* vert traité de la même manière que *T. licarnatum* alors que la biomasse des mauvaises herbes variait de 41 % de réduction à 45% d'augmentation dans les résidus desséchés de *V. villosa* comparé au traitement sans plante de couverture (Teasdale et Daughtry, 1993). Ainsi, une plante de couverture vivante est capable de supprimer plus de mauvaises herbes que les résidus desséchés de plantes de couverture.

Les paillis vivants peuvent aussi être associés à une culture principale de rente en les plantant peu avant, au même moment, ou peu après l'installation de la culture de rente. Ces cultures secondaires cultivées en association sont souvent considérées comme des plantes étouffantes (Liebman et Staver, 2001). Les plantes étouffantes devraient être des espèces qui s'établissent plus rapidement que les mauvaises herbes et dont la période de pointe de croissance coïncide avec les premières émergences des mauvaises herbes, mais ne coïncide pas avec la levée des cultures. Idéalement, les plantes étouffantes devraient supprimer l'établissement des mauvaises herbes pendant la période critique, c'est à dire la période pendant laquelle l'émergence des mauvaises herbes peut causer des pertes à la récolte des cultures (Buhler et *al.* 2001). Puis, la plante étouffante entrera en sénescence suivant cette période critique pour la compétition des mauvaises herbes, et subséquemment, minimisera la compétition entre les plantes étouffantes et la culture principale pendant le reste de la campagne. Une des approches est l'utilisation de plantes annuelles à cycle long, à croissance lente, à établissement et à maturité rapide, plantées avec les cultures à graines de la grande saison. Par exemple, en l'utilisant *Brassica* et *Medicago* ssp. annuels, Buhler *et al.* (2001), ont observé différents niveaux de contrôle des mauvaises herbes dépendant de variables liées à la saison, à l'espèce, et à la période. Cependant, un bon contrôle de mauvaises herbes était souvent associé à des pertes de rendement.

Dans les systèmes tropicaux, Chikoye *et al.* (2001), ont semé plusieurs plantes étouffantes avec différentes caractéristiques de croissance dans le système associatif *Z. mays- Manihot esculenta* Crantz et ont trouvé que *Mucuna cochinchinensis* (Lour) A. Chev., *Lablab purpureus* L. et *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth. étaient efficaces pour la récupération des champs fortement infestés de l'espèce pérenne difficile à contrôler qu'est *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. Après trois ans la biomasse de rhizome de *I. cylindrica* était réduit de 94 % par 5 sarclages annuels, 89 % par *M. cochinchinensis*, 77 % par *L. purpureus*, 74% par *V. unguiculata*, et 55 % par *P. phaseoloides*. Akobunddu *et al.* (2000) ont observé que *Mucuna* spp. a supprimé *I. cylindrica* jusqu'à la campagne suivante où la récolte de maïs était supérieure, et la main d'œuvre pour le sarclage diminuée de 50 % comparée aux parcelles sans plante de couverture. Les paillis vivants de *Mucuna deeringiana* (Bort) Merr. et *Cavanalia ensiformis* (L.) DC. ont réduit la biomasse des mauvaises herbes et ont amélioré le rendement de *Z. mays* dans un système traditionnel de brûlis au Mexique (Caamal-Maldonado, 2001). Liebman et Dyck, (1993) ont revu la littérature où une ou plusieurs cultures principales étaient associées avec une plante étouffante et ont trouvé que la biomasse de mauvaises herbes était plus faible avec la plante étouffante que sans la plante étouffante dans 47 cas, variable dans 3 cas, et plus forte dans 4 cas. Ainsi, les plantes étouffantes peuvent être un outil efficace dans la gestion des mauvaises herbes aussi bien que dans l'amélioration de la fertilité du sol et être une source d'alimentation supplémentaire si des parties de reproduction comestibles sont produites par la plante de couverture.

L'obstacle majeur à l'adoption et à l'utilisation des paillis vivants est le manque de sélectivité. Typiquement, un paillis vivant qui est assez compétitif pour supprimer les mauvaises herbes supprimera aussi la croissance des cultures et la récolte. La plupart des recherches sur les paillis vivants étaient orientées vers la documentation et l'allègement de ce problème (Lieebman et Staver, 2001; Teasdale, 1998). Plusieurs approches ont été utilisées pour réduire la compétition entre le paillis vivant et les cultivars de rente sans éliminer les qualités désirables et les intérêts des paillis vivants (voir applications en dessous). Ces tentatives pour atteindre la sélectivité ont connu des succès variables mais souvent manquent de cohérence.

Applications pratiques

Le paillis vivant idéal pour la suppression des mauvaises herbes doit avoir les caractéristiques suivantes :

- capacité à fournir une couverture complète du sol avec une végétation dense ;
- établissement rapide et une croissance qui développe une végétation plus rapidement que les mauvaises herbes ;
- sélectivité entre suppression des mauvaises herbes et la culture associée.

Les moyens pour atteindre la sélectivité entre les mauvaises herbes et la culture associée incluent:

1. L'utilisation d'un paillis vivant à croissance lente qui entre en compétition principalement pour la lumière. Dans ce cas, tant que le paillis s'établira avant les mauvaises herbes, il maintiendra la suppression de ces dernières en les privant de lumière mais n'aura pas d'impact sur les cultures plus hautes et ne pourra pas établir la compétition de façon excessive avec les cultures pour les ressources du sol comme l'eau et les éléments nutritifs.
2. Planter des paillis vivants afin que leur période de pointe de croissance ne coïncide pas avec la période critique pendant laquelle la compétition aurait un impact important sur la récolte.
3. Réduire l'écartement entre les lignes de culture et/ou augmenter la densité de population de la culture pour accroître la compétition de la culture par rapport au paillis vivant.

4. Fournir de l'eau et de l'azote supplémentaires pour compenser les ressources utilisées par les plantes du paillis vivant.
5. Supprimer le paillis vivant afin de réduire la compétition avec la culture.

Les moyens pour supprimer le paillis vivant incluent :

a) une application d'un herbicide à une dose suppressive, mais non létale.
b) une application en bande d'un herbicide pour tuer le pailli vivant sur les lignes de culture afin de réduire la compétition à l'intérieur des lignes et permettre la suppression des mauvaises herbes par les paillis entre les lignes.
c) labour en bande pour fournir des conditions favorables de plantation sans compétition à l'intérieur des lignes de culture mais pour permettre une suppression des mauvaises herbes entre les lignes, par le paillis vivant.
d) Faucher pour réduire la taille et la vigueur du paillis vivant.

LES PLANTES DE COUVERTURE COMME PARTIE D'UN SYSTEME INTEGRE DE GESTION DES MAUVAISES HERBES

Les principes de gestion holistique et un changement vers un système d'approche pour la protection des cultures est vital pour combattre aussi bien les mauvaises herbes que les autres nuisibles en agriculture. Une gestion écologique des mauvaises herbes vise des pratiques préventives et des transformations naturelles de régulation des populations avec des herbicides ou seulement avec des interventions culturales en cas de nécessité. L'accent est mis sur la maximisation des processus écologiquement bénéfiques dans les systèmes d'exploitation qui peuvent maintenir les populations de mauvaises herbes à des niveaux bas et maniables. Ainsi, les systèmes agricoles sont simplifiés comparés aux écosystèmes naturels, il y a d'abondantes opportunités pour rétablir et gérer les systèmes agricoles pour réduire les populations de mauvaises herbes.

La vie et la mort de matériels végétaux associées avec l'utilisation de plantes de couverture en agriculture conviennent particulièrement à l'amélioration des systèmes de gestion de mauvaises herbes sur des bases écologiques. Généralement un environnement biologique et physique varié à la surface des sols comme ceux associés aux plantes de couverture offre des opportunités de régulation et minimisent la population des mauvaises herbes. Ledman et Gallandt (1997) proposent qu'un bon système de gestion intégré de mauvaises herbes peut être obtenu en combinant plusieurs stratégies ou "de petits coups" qui pourront cumulativement réduire l'intimité relative entre mauvaises herbes et cultures. Un système intégré incluant les plantes de couverture en combinaison avec d'autres stratégies peut améliorer le contrôle des mauvaises herbes comparées à la confiance en une seule stratégie. Non, toutes les stratégies de gestion des mauvaises herbes ne sont pas cependant compatibles avec les plantes de couverture. Par exemple, les herbicides actifs du sol peuvent être adsorbés par les résidus des plantes de couverture et sont moins efficaces avec, que sans plantes de couverture. Le labour mécanique n'est pas souvent efficace dans les systèmes où le labour est réduit où les plantes de couvertures vertes ou mortes peuvent interférer avec les équipements de labour et où les sols non labourés sont moins susceptibles à fragmenter et à la dessécher les plantules des mauvaises herbes comme c'est le cas d'un sol propre et bien labouré. Les plantes de couvertures peuvent être plus compatibles avec des mesures de contrôle comme les herbicides de post–levée le contrôle biologique des agents pathogènes qui sont sur les feuillages des mauvaises herbes après émergence que les pratiques qui opèrent à travers le milieu sol. Les stratégies à long terme les plus importantes ont besoin d'être mis au point pour maintenir la population des mauvaises herbes à un niveau bas à travers les rotations des cultures étouffantes, l'espacement des cultures et la gestion de la fertilité.

En fin de compte, la gestion des mauvaises herbes représente l'un des avantages potentiels de l'utilisation des plantes de couverture. La gestion des plantes de couverture doit être conçue pour optimiser tous les avantages potentiels qui peuvent dériver des plantes de couverture et minimiser leurs impacts négatifs. Par exemple, un niveau élevé de biomasse de plantes de couverture peut être désirable pour le contrôle de l'érosion et la suppression des mauvaises herbes mais peut interférer avec les activités de plantation, le maintien des sols à des températures qui sont très froides au printemps, ou concurrencer les cultures dans les sols à humidité réduite. Les pratiques de gestion qui encouragent une dégradation rapide des plantes de couverture comme le fauchage sont susceptibles de réduire l'efficacité de suppression des mauvaises herbes mais peuvent élever la libération d'azote qui peut stimuler la croissance des plantes précoces. L'épuisement de l'humidité du sol par les plantes de couverture sera la préoccupation principale de gestion dans ces zones où l'humidité du sol constitue un facteur limitant dans la production. La gestion des plantes de couverture demande une compréhension de tous les impacts potentiels dans les systèmes de production, la définition des objectifs les plus importants à atteindre par l'utilisation de plantes de couverture et une approche équilibrée pour atteindre ces objectifs.

Applications pratiques

1. Intégrer les plantes de couverture dans les approches de gestion des mauvaises herbes à long-terme qui incluent un plan de rotation pour minimiser aussi bien les populations que les interventions pour contrôler les mauvaises herbes qui émergent.
2. Faire la rotation des plantes de couverture à l'intérieur des rotations culturales. L'utilisation continue de la même plante de couverture ou des plantes de couvertures avec les mêmes schémas de plantation et de croissance conduira à la sélection d'espèces de mauvaises herbes adaptées à ces situations. Aussi, les plantes de couverture peuvent servir comme hôtes pour les nématodes et les pathogènes et peuvent accroître la population de ces nuisibles. Les plantes de couverture devraient être mises en rotation de la même manière que les cultures pour réduire l'accroissement des populations de mauvaises herbes et des nuisibles.
3. Les plantes de couverture peuvent permettre la réduction d'intrants herbicides. La suppression des mauvaises herbes occasionnée par les résidus des plantes de couverture permettent souvent aux cultures de s'établir avant les mauvaises herbes. Plusieurs herbicides de sol, de pré-semis ou de pré-levée seront adsorbés par les résidus des plantes de couverture et deviendront inefficaces. L'utilisation de ces produits avec un niveau élevé de résidus de plantes de couverture ne serait donc pas rentable. Cependant, les herbicides de post - émergence qui sont appliqués aux feuillages des mauvaises herbes émergées peuvent être utilisés efficacement dans le système de plantes de couverture. Ils peuvent être utilisés seulement en cas de nécessité et peuvent être sélectionnés pour des espèces de mauvaises herbes spécifiques qui ont besoin d'être contrôlées. Cette approche pourrait réduire les pertes d'herbicide pour l'environnement en remplaçant les herbicides de pré-levée qui sont persistants et souvent détectés dans les sols et à la surface des eaux avec les herbicides de post-levée qui sont utilisés à de faibles niveaux et sont moins persistants.
4. Une gestion équilibrée des plantes de couverture pour la suppression des mauvaises herbes avec d'autres outils de gestion. L'objectif premier de la gestion des plantes de couverture doit provenir d'autres avantages importants des plantes de couverture comme la contribution en azote pour les cultures de rente ou l'allégement des températures élevées du sol. Alternativement, le besoin de maximiser les influences négatives des plantes de couverture comme l'épuisement des réserves d'humidité du sol, ou l'interférence avec les opérations culturales peuvent devenir d'importantes considérations. Une bonne gestion des plantes de couverture demande une approche équilibrée pour maximiser les avantages et minimiser les inconvénients dans le but d'atteindre un agro-ecosystème productif et durable.

BIBLIOGRAPHIE

Akobundu, I.O., Udensi, U.E. & Chikoye, D. 2000. Velvetbean (*Mucuna* spp.) suppressesspeargrass (*Imperata cylindrical* (L.) Raeuschel) and increases maize yield. *Int. J. Pest Management.* 46: 103-108.

Ballard, C.L., Scopel, A.L., Sánchez, R.A. & Radosevich, S.R. 1992. Photomorphogenic processes in the agricultural environment. *Photochem. and Photobiol.* 56: 777-788.

Boydston, R.A. & Hang, A. 1995. Rapeseed (*Brassica napus*) green manure crop suppresses weeds in potato (*Solanum tuberosum*). *Weed Tech.* 9: 669-675.

Buhler, D.D., Kohler, K.A., & Foster, M.S. 2001. Corn, soybean, and weed responses to spring-seeded smother plantes. *J. Sustain. Agric.* 18: 63-79.

Caamal-Maldonado, J.A., Jimenez-Osornio, J.J. , Torres-Barrag, A. & Anaya, A.L. 2001. The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agron. J.* 93: 27-36.

Cheema, Z.A. & Khaliq, A. 2000. Use of sorghum allelopathic properties to control weeds in irrigated wheat in a semi-arid region of Punjab. *Agricul. Ecosyst. Environ.* 79: 105-112.

Chikoye, D., Ekeleme, F. & Udensi, U.E. 2001. Cogongrass suppression by intercropping cover crops in corn/cassava systems. *Weed Sci.* 49: 658-667.

Dyck, E., Liebman, M. & Erich, M.S. 1995. Crop-weed interference as influenced by a leguminous or synthetic fertilizer nitrogen source. I. Double-cropping experiments with crimson clover, sweet corn, and lambsquarters. *Agricul. Ecosyst. Environ.* 56: 93-108.

Einhellig, F.A. 1996. Interactions involving allelopathy in cropping systems. *Agron. J.* 88: 886-893.

Enache, A.J. & Ilnicki, R.D. 1990. Weed control by subterranean clover (*Trifolium subterraneum*) used as a living mulch. *Weed Tech.* 4: 534-538.

Fujii, Y. 1999. Allelopathy of hairy vetch and *Macuna*; their application for sustainable agriculture. pp.289-300. *In* C.H. Chou *et al. Biodiversity and Allelopathy from Organisms to Ecosystems in the Pacific.* Academia Sinica, Taipei.

Hartwig, N.L. & Ammon, H.U. 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.*50: 688-699.

Hutchinson, C.M. & McGiffen, M.E., Jr. 2000. Cowpea cover crop mulch for weed control in desert pepper production. *HortScience* 35: 196-198.

Inderjit & Keating, K.I. 1999. Allelopathy: Principles, procedures, processes, and promises for biological control. *Adv. Agron.* 67: 141-231.

Liebman, M. & Dyck, E. 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecologic. Applic.* 3: 92-122.

Liebman, M. & Gallandt, E.R. 1997. *Many little hammers: Ecological management of crop-weed interactions.* pp. 291-343. *In* Jackson, L.E., ed. Agricultural Ecology. Physiological Ecology Series. Academic Press, San Diego, CA.

Liebman, M. & Mohler, C.L. 2001. Weeds and the soil environment. pp. 210-268. *In* M. Liebman *et al. Ecological Management of Agricultural Weeds.* Cambridge University Press, New York.

Liebman, M. & Staver, C.P. 2001. Crop diversification for weed management. pp. 322-374.*In* M. Liebman *et al. Ecological Management of Agricultural Weeds*. New York. Cambridge University Press.

Mohler, C.L. & Teasdale, J.R. 1993. Response of weed emergence to rate of *Vicia villosa* Roth and *Secale cereale* L. residue. *Weed Res.* 33: 487-499.

Moyer, J.R., Blackshaw, R.E., Smith, E.G. & McGinn, S.M. 2000. Cereal cover crops for weed suppression in a summer fallow-wheat cropping sequence. *Can. J. Plante Sci.* 80: 441-449.

Sustainable Agriculture Network. 1998. *Managing cover crops profitably.* Second edition. Handbook Series Book 3. Beltsville, MD.

Teasdale, J.R. 1998. Cover crops, smother plantes, and weed management. pp. 247-270. *In* J.L. Hatfield *et al. Integrated Weed and Soil Management*. Ann Arbor Press, Chelsea, MI, USA.

Teasdale, J.R. & Abdul-Baki, A.A. 1998. Comparison of mixtures vs. monocultures of cover crops for fresh-market tomato production with and without herbicide. *HortScience* 33: 1163-1166.

Teasdale, J.R. & Daughtry, C.S.T. 1993. Weed suppression by live and desiccated hairy vetch. *Weed Sci.* 41: 207-212.

Teasdale, J.R. & Mohler, C.L. 1993. Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye. *Agron. J.* 85: 673-680.

Teasdale, J.R. & Mohler, C.L. 2000. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches. *Weed Sci.* 48: 385-392.

Méthodes préventives et culturales pour la gestion des mauvaises herbes

Paolo Bàrberi

INTRODUCTION

Dans beaucoup de systèmes agricoles du monde, la compétition des mauvaises herbes est l'un des facteurs majeurs qui réduisent les rendements et les revenus des producteurs. Dans les pays développés, malgré la disponibilité de solutions de hautes technologies (herbicides sélectifs et cultures génétiquement modifiées résistantes aux herbicides), la part des pertes de rendement liées aux mauvaises herbes ne semble pas diminuer significativement dans le temps (Cousens et Mortimer, 1995). Dans les pays en développement, les herbicides sont rarement accessibles à des coûts raisonnables, et de ce fait, les producteurs préfèrent les méthodes alternatives de gestion des mauvaises herbes.

Les succès limités dans le monde entier dans le contrôle des mauvaises herbes sont probablement le résultat d'une simplification à outrance pour appréhender le problème. L'accent était trop mis sur le développement des tactiques de contrôle des mauvaises herbes (surtout les herbicides synthétiques) comme 'la' solution pour tous les problèmes de mauvaises herbes, alors que l'importance de l'intégration de différentes tactiques (préventives, culturales, mécaniques et méthodes chimiques) dans une stratégie de gestion des mauvaises herbes basée sur le système cultural a été pendant longtemps négligé.

La gestion intégrée des mauvaises herbes est basée sur la connaissance de leurs caractéristiques biologiques et écologiques pour comprendre comment leur présence peut être modulée par les pratiques culturales. En se basant sur ces connaissances, le producteur doit premièrement mettre au point une stratégie globale de gestion des mauvaises herbes à travers la séquence de ses cultures de rente, et ensuite choisir la meilleure méthode de contrôle directe des mauvaises herbes au cours du cycle cultural. En marge de ceci, il doit être rappelé que la gestion des mauvaises herbes est souvent strictement liée à la gestion de la culture elle même. Aussi, les interactions entre la gestion des mauvaises herbes et d'autres pratiques culturales doivent être sérieusement prises en compte. Par exemple, l'introduction des plantes de couverture dans la séquence des cultures est une voie intéressante pour intégrer la gestion des mauvaises herbes à la gestion des éléments nutritifs dans les systèmes à faibles intrants, avec des avantages complémentaires sur d'autres propriétés importantes des agro-écosystèmes (par exemple fertilité du sol, rétention de l'humidité du sol, biodiversité, etc.).

COMMENT METTRE EN ŒUVRE UNE STRATEGIE EFFICACE DE GESTION DES MAUVAISES HERBES

Une stratégie efficace à long terme de gestion des mauvaises herbes est basée sur l'application pratique du concept écologique de " diversification maximum des perturbations", qui signifie la diversification le plus que possible des cultures et des pratiques culturales dans un agro-écosystème donné. Ceci résulte en une interruption continue des niches écologiques des mauvaises herbes (Liebman et Davis, 2000) et en conséquence, une minimisation des risques d'évolution de la flore des mauvaises herbes vers la présence d'un nombre limité d'espèces hautement compétitives. En outre, un système cultural hautement diversifié réduit aussi les risques de développement de populations de mauvaises herbes résistantes aux herbicides.

Dans la pratique, les stratégies de gestion des mauvaises herbes doivent intégrer les méthodes indirectes (préventives) et les méthodes directes (culturales et curatives). La première catégorie

inclut toutes les méthodes utilisées avant le semis alors que la seconde inclut toutes les méthodes appliquées au cours du cycle cultural. Les deux catégories de méthodes peuvent aussi bien influencer la densité des mauvaises herbes (par exemple le nombre de plantes par unité de surface que et/ou le développement des mauvaises herbes (production de biomasse et couverture du sol). Cependant, alors que les méthodes indirectes visent essentiellement la réduction du nombre de plantes émergeant dans une culture, les méthodes directes ont pour but d'accroître l'aptitude à la compétition des plantes vis à vis des mauvaises herbes.

Les méthodes préventives incluent la rotation des cultures, les plantes de couverture (quand elles sont utilisées comme engrais verts ou paillis non vivants), les modes de labour, la préparation des lits de semence, la solarisation du sol, la gestion des systèmes drainage et d'irrigation et les résidus de récolte.

Les méthodes culturales incluent la période de semis et la disposition spatiale, le choix des cultivars, les plantes de couverture (quand elles sont utilisées comme des paillis vivants), l'association culturale et la fumure.

Les méthodes curatives incluent toutes méthodes chimiques, physiques (par exemple mécaniques et thermiques) et biologiques utilisées pour le contrôle direct des mauvaises herbes dans une culture déjà établie. Une liste des principales méthodes qui peuvent être utilisées dans la stratégie de gestion intégrée des mauvaises herbes est présentée dans le tableau 1.

Dans la suite, les principaux effets sur les mauvaises herbes des méthodes préventives et culturales sont décrits en essayant de mettre en exergue spécialement leurs possibles interactions qui ne sont pas toujours faciles à prédire au champ. Les méthodes curatives ne sont pas traitées ici; cependant on doit insister sur le fait que l'on s'attend à ce que l'efficacité de chacun d'eux puisse s'accroître si les méthodes préventives et culturales sont concurremment appliquées.

LES METHODES PREVENTIVES

La rotation des cultures

La différenciation des plantes cultivées au cours du temps sur la même parcelle est un des moyens primaires bien connus de contrôle préventif des mauvaises herbes. Evidemment, différentes cultures supposent différentes pratiques culturales, qui agissent comme un facteur dans l'interruption du cycle de croissance des mauvaises herbes pour ainsi prévenir l'inversion de la flore vers une forte augmentation des espèces à problèmes (Karlen, 1994). Au contraire, la culture continue sélectionne la flore des mauvaises herbes en favorisant ces espèces qui sont plus semblables aux cultures et tolérantes aux méthodes directes de contrôle des mauvaises herbes utilisées (par exemple herbicides) par des applications répétées des mêmes pratiques agricoles d'une année à l'autre.

En plus, la culture continue peut négativement inter agir avec le système de labour et modifier la flore des mauvaises herbes avec une composition qui crée des difficultés de contrôle. Par exemple, en culture continue de céréales d'hiver dans les régions tempérées, un labour minimum peut occasionner la dominance de graminées ayant des semences à faible dormance comme, *Alopecurus myosuroides* et *Bromus* spp., qui peuvent apparaître après quelques années (Froud-Williams, 1983). Dans ces cas, l'utilisation accrue de graminicides agit comme un facteur supplémentaire de sélection de la flore de mauvaises herbes et peut aussi accélérer la sélection de biotypes résistants aux herbicides. Pour reconstituer les situations floristiques hautement dégradées, comme celle qui vient d'être décrite, il est impératif de faire la rotation des céréales avec des cultures ayant des périodes de croissances différentes, et aussi de labourer le champ de temps en temps afin de désavantager les espèces de graminées à faible dormance dont les semences sont souvent incapables d'émerger des profondeurs. S'il y a une longue période de

jachère, entre la céréale et la culture suivante, ceci peut être mis à profit pour stimuler l'émergence des mauvaises herbes à problème, qui sont par la suite détruites par un labour supplémentaire ou par des herbicides.

La rotation de cultures ayant les mêmes périodes de croissance bien que certainement préférable à la culture continue, n'a pas autant de succès que les rotations entre les cultures de cycles différents en matière de réduction du nombre de mauvaises herbes émergeant dans le champ. Comparée à la réduction de la densité des mauvaises herbes, l'effet de la rotation culturale sur la réduction de la biomasse des mauvaises herbes est moins systématique car il dépend de facteurs telles que:

- la capacité de compétitivité des cultures incluses dans la rotation;
- l'efficacité des méthodes de contrôle direct des mauvaises herbes (par exemple herbicides), et
- la fréquence du labour et du sarclage.

Tableau 1. Classification des pratiques culturales potentiellement applicables dans un système intégré de gestion des mauvaises herbes, basée sur leur effet dominant.

Pratique cultural	Catégorie	Effet dominant	Exemple
Rotation culturale	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Alternance entre les cultures d'hiver, et de printemps- été
Plantes de couverture (utilisées comme engrais vert ou paillis non vivants)	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Plantes de couverture cultivées entre deux cultures de rente
Premier Labour	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Labour profond, alternance entre labour profond et labour réduit
Préparation du lit de semence	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Technique de faux-lits de semences
Solarisation du sol	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Utilisation de films noirs ou transparents (en champ ou en serre)
Système d'irrigation et de drainage	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Dispositifs d'irrigation (micro/ goutte à goutte), nettoyage de la végétation tout au long des digues
Gestion des résidus de récolte	Méthode préventive	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Gestion de chaume
Semis/ date de plantation et disposition spatiale des cultures	Méthode culturale	Amélioration de l'habileté à la compétitivité des cultures	Utilisation de transplants, fort densité de semis, distance réduite entre interlignes, anticipation ou retard de semis ou de transplantation
Choix des génotypes	Méthode culturale	Amélioration de l'habileté à la compétitivité des cultures	Utilisation de variétés à émergence rapide, à forte croissance et une bonne couverture du sol dès les premiers stades
Plantes de couverture (utilisées comme paillis vivants)	Méthode culturale	Amélioration de l'habileté à la compétitivité des plantes (végétation)	Légumineuses de couverture semées dans les interlignes des cultures
Associations culturales	Méthode culturale	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes, amélioration de l'aptitude à la compétition des plantes	Cultures de rente associées
Fertilisation	Méthode culturale	Réduction de l'émergence des mauvaises herbes, amélioration de l'aptitude à la compétition des cultures	Utilisation de fertilisant organiques à décomposition lente et amendements, positionnement de l'engrais anticipation ou retard de fumure de pré-semis, ou d'application en bande de l'azote d'entretien
Labour/sarclo-buttage	Méthode curative	Destruction de la végétation existante, réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Hersage de post levée, sarclages ou buttage
Application d'herbicide	Méthode curative	Destruction de la végétation existante, réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Pulvérisation de pré ou de post levée
Contrôle thermique des mauvaises herbes	Méthode curative	Destruction de la végétation existante, réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Destruction des mauvaises herbes par le feu en pré-levée ou localement en post levée
Contrôle biologique des mauvaises herbes	Méthode curative	Destruction de la végétation existante, réduction de l'émergence des mauvaises herbes	Utilisation de pathogènes ou de déprédateurs spécifiques à la mauvaise herbe

Les plantes de couverture (utilisées comme engrais verts ou pallis vivants)

L'inclusion des plantes de couverture dans une rotation dans la période de temps entre deux cultures de rente est une autre bonne méthode préventive conseillée dans les stratégies de gestion des mauvaises herbes. Les plantes de couverture ne donnent pas une récolte commercialisable, mais, en prolongeant le temps de couverture des sols par la végétation, elles exercent une série d'effets bénéfiques sur l'agro-écosystème, comme l'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles (radiation solaire, eau, éléments nutritifs du sol), réduisent l'écoulement de l'eau, le lessivage des éléments nutritifs et l'érosion du sol et enfin mais pas des moindres, la suppression des mauvaises herbes (Lal *et al.* 1991).

L'effet des plantes de couverture sur les mauvaises herbes dépend largement des espèces de plantes de couverture et de la gestion, de la culture de rente suivante, et de la composition de la communauté de mauvaises herbes (Bàrberi et Mazzoncini, 2001). La suppression des mauvaises herbes est exercée partiellement à travers la compétition pour les ressources (pour la lumière, les éléments nutritifs et l'eau) pendant la période de croissance de la plante de couverture et partiellement par les effets physiques et chimiques qui apparaissent quand les résidus des plantes de couvertures sont laissés à la surface du sol comme du paillis non vivant ou enfouis par le labour et utilisés ainsi comme de l'engrais vert (Mohler et Teasdale, 1993; Teasdale et Mohler, 1993). L'interférence avec les mauvaises herbes, incluant la compétition, les effets physiques et allélopathiques, est généralement plus forte quand les graminées ou les crucifères sont utilisées comme plantes de couverture comparativement à l'utilisation des légumineuses (Blum *et al.* 1997). L'interférence des plantes de couverture et de leurs résidus est liée à leur occupation des niches écologiques qui autrement seraient occupées par les mauvaises herbes. Ceci est principalement, le résultat de la séquestration des éléments nutritifs du sol (spécialement l'azote), de la libération des allélochimiques (par exemple glucosynolates des crucifères et sorgoléone du *Sorghum* spp.) et des modifications du micro-environnement du sol (Gallandt *et al.* 1999). Les exemples de plantes de couverture hautement suppressives sont le seigle (figure 1), le sorgho, les choux frisés, la rocket et la moutarde. A l'opposé, bien que la suppression directe des mauvaises herbes par les légumineuses peut être significative, l'effet résiduel de leur contrôle des mauvaises herbes est souvent faible car la forte quantité d'azote libérée par leurs résidus après la destruction de la plante de couverture stimule l'émergence des mauvaises herbes, spécialement quand les légumineuses sont utilisées comme engrais verts (Blum *et al.* 1997).

Quand les plantes de couverture sont utilisées comme du paillis non vivant, (c'est à dire laisser à décomposer à la surface du sol), la suppression des mauvaises herbes semble souvent être le résultat des effets physiques du paillis plutôt que des effets dus aux éléments nutritifs ou allelochimiques (Teasdale et Mohler, 2000). En particulier, la suppression des mauvaises herbes semble être liée à l'indice de surface du paillis (surface de paillis divisé par unité de surface du sol), qui influence l'extinction de la lumière à travers le paillis et conséquemment la germination des semences des mauvaises herbes. Les espèces de mauvaises herbes à petites graines semblent être plus sensibles que les espèces à grosses graines aux effets physiques du paillis tout comme aux allélochimiques (Liebman et Davis, 2000). Le semis à temps des plantes de couverture est très important pour augmenter la production de biomasse et partant, augmenter leur potentiel de suppression des mauvaises herbes.

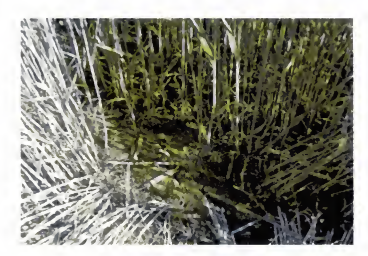


Figure 1. Forte suppression de mauvaises herbes par le seigle, plante de couverture (Photo : Bàrberi).

Les plantes de couvertures peuvent aussi inter agir avec d'autres biota; par exemple, elles favorisent l'établissement de mycorhizes arbo-vésiculaires, qui en retour peuvent changer la composition de la flore des mauvaises herbes en favorisant les espèces de plantes à mycorhizes au détriment des espèces non- mychorhisiennes (Jordan *et al.* 2000).

LES SYSTEMES DE LABOUR

L'effet du premier labour sur les mauvaises herbes est principalement lié au type d'instrument utilisé et à la profondeur du labour. Ces facteurs influencent considérablement la distribution des semences et des propagules des mauvaises herbes à travers le profil du sol et de ce fait ils affectent directement le nombre de mauvaises herbes qui peuvent émerger dans un champ.

Le labour de lame est très efficace dans la réduction de la densité des mauvaises herbes et est ainsi, une importante méthode de prévention où les producteurs sont obligés (ou ont la volonté) d'utiliser des méthodes de contrôle direct des mauvaises herbes partiellement suppressives (par exemple désherbage mécanique), et réduit la main d'œuvre nécessaire pour le désherbage manuel subséquent. A l'opposé, le labour sans retournement du sol (particulièrement avec le sans labour), les semences des mauvaises herbes sont seulement partiellement enterrées, et de ce fait sont distribuées principalement dans la couche superficielle du sol, de laquelle elles peuvent facilement germer et s'établir.

Théoriquement, si le contrôle direct des mauvaises herbes était assez efficace pour réduire la production de semences de mauvaises herbes (S), les systèmes de labour sans retournement du sol devraient réduire au cours du temps la densité des mauvaises herbes à un niveau plus élevé que les systèmes de labour basés sur le retournement du sol. Ceci devrait arriver à cause de la forte perte de banques de semences de mauvaises herbes (D) dans les sols non retournés, entraînée par de forts taux d'émergence et des conditions environnementales (liées à l'absence d'enfouissement des semences) non favorables à une dormance secondaire ; et par une plus forte prédation des semences par la faune du sol. En terme de dynamique de population des mauvaises herbes, une réduction de la taille de la population apparaît si $D > S$, une situation qui est rarement rencontrée avec le labour sans retournement du sol, car le contrôle au champ des mauvaises herbes est rarement complet, et de ce fait, les mauvaises herbes ont toutes les chances de produire des semences et de reconstituer la banque de semences du sol. Pour cette raison, les densités des mauvaises herbes dans les systèmes de labour minimum et de sans labour sont invariablement plus élevées que dans les systèmes à base de labour (Froud -Williams, 1988; Cardina *et al.* 1991; Spandl *et al.* 1999). Les données sur les banques de semences obtenues d'une expérience de longue durée dans laquelle quatre systèmes de labour ont été utilisés pendant

12 années consécutives en culture continue de blé d'hiver ou dans la rotation haricot- blé d'hiver ont montré que la densité des plantules de mauvaises herbes était plus élevée sur les parcelles sans labour, à labour minimum (c'est à dire hersage rotatif à 15 cm de profondeur), et labour (à 45cm de profondeur) respectivement dans les couches de sol de 0-15, 15-30, et 30-45 cm (Bàrberi et Lo Cascio, 2001). La densité totale dans l'ensemble (0-45 cm) des couches ne différait pas significativement entre les systèmes de labour mais dans le sans labour plus de 60% de la totalité des plantules ont émergé de la couche superficielle comparativement à une moyenne de 43 % dans les autres systèmes de labour (Figure 2). La rotation des cultures n'a influencé ni la taille des banques de semence des mauvaises herbes, ni la distribution des plantules dans les couches du sol, et a eu une faible influence sur l'abondance des espèces dominantes. La banque de semence des mauvaises herbes était dominée (>66 %de la densité totale) par *Conyza canadensis* et *Amaranthus retroflexus* qui ont proliférer avec le labour et le sans labour, respectivement. Parmi les autres espèces majeures, *Bilderdykia convolvulus* et *Chenopodium album* étaient surtout associées avec le labour avec retournement du sol, *Papaver rhoeas* et *Portulaca oleraceae* avec le labour minimum et *Lolium multiflorum* et *Veronica* spp. avec le sans labour. Les résultats suggèrent que bien que la substitution du labour avec retournement par le labour sans retournement du sol (spécialement par le labour minimum) ne conduise pas forcément à l'accroissement des problèmes de mauvaises herbes à long terme, l'utilisation du sans labour va vraisemblablement augmenter les infestations par les mauvaises herbes compte tenu d'un nombre plus élevé de plantules en provenance de la couche superficielle du sol, et conséquemment, un besoin accru d'application d'herbicide. L'utilisation sans labour est désirable dans les tropiques car ces conditions peuvent aggraver les problèmes de contrôle des mauvaises herbes.

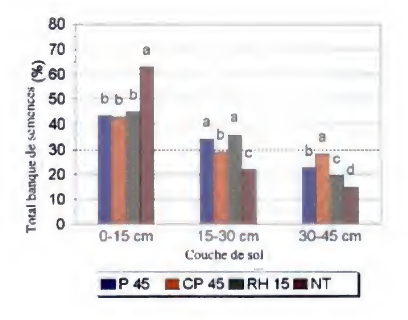


Figure 2. Pourcentage de distribution des plantules de mauvaises herbes dans les couches de sol dans un labour avec retournement du sol à 45 cm de profondeur (P45), labour sans retournement du sol à 45 cm de profondeur (CP45), hersage rotatif à 15 cm de profondeur (RH 15) et sans labour (NT) après 12 années consécutives d'application des différents systèmes de labours (d'après Bàrberi et Lo Cascio, 2001, modifié; les données sont des moyennes de 2 rotations culturales). Pour chaque couche, les barres marquées des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à P< ou = 0.05 (test LSD).

Les perturbations causées aux mauvaises herbes par le labour dépendent plus des types d'outils utilisés que de la profondeur de labour. Les outils qui ne retournent pas le sol (par exemple les ciseaux) augmentent la densité des mauvaises herbes et changent la composition de la flore des mauvaises herbes dans le sens d'une présence accrue de bisannuelles, de vivaces et d'herbes annuelles qui ne sont liées à aucune saison. La plupart de ces espèces sont caractérisées par des semences disséminées par le vent, avec des longévités et des dormances réduites et sont incapables d'émerger des couches profondes du sol (Zanin *et al.* 1997). Des exemples d'espèces souvent favorisées par le non retournement du sol par le labour ou le sans labour sont *Agropyron repens*, *Calystegia sepium*, *Lolium perenne* et *Plantago* spp. (pérennes), *Digitaria sanguinalis*, *Lolium multiflorum*, *Setaria viridis* et *Thlaspi arvense* (annuelles).

L'abondance relative des espèces pérennes dans une communauté de mauvaises herbes est aussi favorisée par la réduction de la fréquence de labour sur la séquence culturale. Par exemple, l'inclusion d'un couloir de vivaces dans une rotation culturale signifie que le sol n'est pas labouré annuellement. Le manque de perturbation du sol, couplé avec un contrôle accru des mauvaises herbes annuelles par des fauchages répétés dans les couloirs peut changer la composition de la communauté des mauvaises herbes vers la présence élevée de biennales et de vivaces. A l'opposé, un système basé sur le labour avec retournement du sol semble encourager quelques dicotylédones annuelles comme *Chenopodium album*, *Papaver rhoeas*, et *Polygonum* spp., même si cet effet est souvent modulé par l'efficacité des méthodes de contrôle direct des mauvaises herbes (par exemple herbicides) utilisées dans la rotation des cultures (Légère *et al.* 1993; Liebman *et al.* 1996).

Dans un système cultural donné, la densité des mauvaises herbes peut être réduite à une grande échelle quand les méthodes de labour changent plutôt que quand le même système de labour est utilisé d'une année à l'autre. Un essai à long terme mené à Pisa (Italie) dans une rotation soja-blé d'hiver de deux ans a montré qu'en alternant le labour avec retournement du sol à 50 cm de profondeur avec le labour minimum (hersage rotatif à 15 cm de profondeur), il était possible de réduire la densité des mauvaises herbes dans le blé comparé au labour par les ciseaux (à 50 cm de profondeur), au labour minimum ou au labour superficiel (à 25 cm de profondeur) quand il est utilisé chaque année (Bàrberi *et al.* 2001, Tableau 2). L'utilisation du labour minimum pour le blé d'hiver et du labour profond pour le soja était meilleure que le système inverse car dans le premier cas, la communauté des mauvaises herbes était surtout composée d'espèces peu compétitives (*Anagallis arvensis* et *Papaver rhoeas* contre. *Lolium* spp., *Polygonum aviculare* et *Veronica* spp., dans le second cas). Une voie très simple pour diversifier le système de labour est d'inclure dans une rotation des cultures qui demandent différentes opérations de labour (par exemple céréales et plantes à racines).

PREPARATION DES LITS DE SEMENCE

La préparation de lits de semence présente deux effets contrastés sur les mauvaises herbes : (i) il élimine la végétation qui émerge suite au premier labour ; et (2) il stimule la germination des graines des mauvaises herbes et l'émergence des plantules, grâce au retournement du sol et à la redistribution des semences à travers les couches superficielles de sol. Ensemble, ces deux effets peuvent être exploités par l'application de la technique de faux lit de semences, une méthode préventive, avec l'objectif spécifique de réduire l'émergence des mauvaises herbes dans le cycle cultural suivant.

La technique de faux lit de semence consiste en une anticipation du temps du sarclo-binage pour la préparation du lit de semences, en vue de stimuler le plus possible l'émergence des mauvaises herbes avant le semis. Les mauvaises herbes émergées seront détruites par le second passage du cultivateur ou par l'application d'un herbicide total (glyphosate), le dernier étant utile spécialement là où les mauvaises herbes pérennes sont présentes. Au semis, la banque de semences de ces espèces de mauvaises herbes capables d'émerger ensemble avec la culture est

donc déjà partiellement épuisée et leur émergence dans la culture est réduite. Le sarclo-binage peut être exécutée avec n'importe quel outil mécanique, mais les herses à pointes (Figure 3) sont préférables à cause de leur forte capacité de travail et de leur coût relativement bas. L'application de la technique de préparation de faux lit de semence peut réduire l'émergence des mauvaises herbes de plus de 80 % comparée à la préparation standard du lit de semences (van der Weide *et al.* 2002). Evidemment, l'application de cette technique implique qu'on dispose d'assez de temps (au moins 2-3 mois dans les climats tempérés) entre la récolte précédente et le semis suivant pour permettre aux mauvaises herbes d'émerger. Pour que cette méthode soit efficace, le sol doit avoir assez d'humidité pour permettre la germination des graines. De ce fait, cette méthode est inutile là où la disponibilité de l'eau du sol est limitée. Dans les endroits où les producteurs espèrent de fortes pluies entre le premier labour et le semis, ils doivent évaluer si une anticipation de la préparation du lit de semences peut accroître les risques de dommage à la structure du sol ou de retard au semis car la terre ne sera pas travaillé à temps : les deux effets peuvent contrecarrer les bénéfices de la technique de préparation de faux lit de semences et de ce fait doivent être bien évalués.

Tableau 2. Densité relative (en pour-cent) des principales espèces de mauvaises herbes et densité totale des mauvaises herbes (plantes m^{-2}) observé dans le blé d'hiver juste avant l'application de l'herbicide de post levée (données groupées sur deux ans et trois doses d'azote). Les données sont présentées sont des moyennes de transformations angulaires arc sinus (densité relative) ou de transformations racine carrée (densité totale de mauvaises herbes) pour permettre une interprétation directe des SEDs. DP = labour profond (50 cm); SP = labour superficiel (25 cm) ; TLP = labour de deux couches (labour superficiel + sous-solage à 50 cm) ; CP = labour au ciseau (50 cm); MT = labour minimum (hersage rotatif à 15 cm). Signification du test F (indiqué comme suit) : *,**,***, ns = P< ou égal 0.05, 0.01, 0.001 et non significatif, respectivement. D'après Bàrberi *et al* 2001, modifié.

Espèces	Méthode de labour							
	DP	SP	TLP	CP	MT	MT après DP	DP après MT	SED (6 df)
*Anagallis arvensis***	26.3	15.8	26.7	18.0	15.2	25.8	21.5	3.09
Cerastium arvense ns	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	3.3	0.0	2.65
Lolium spp.*	16.0	8.0	11.9	12.5	18.7	7.2	15.6	3.18
Matricaria chamomilla ns	2.4	2.6	0.0	9.6	0.9	4.7	9.2	5.64
Papaver spp.*	6.8	20.5	7.9	13.9	26.2	12.0	19.1	4.93
Polygonum aviculare ns	25.9	15.3	18.1	21.8	17.4	25.1	20.5	4.55
Rumex spp.***	14.1	7.5	10.3	18.3	7.5	8.1	3.7	1.88
Veronica spp. ns	28.2	53.3	40.9	29.0	40.3	30.2	36.7	9.49
Vicia spp.*	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	4.35
Densité Total des mauvaises herbes **	5.1	7.6	5.0	8.1	9.7	5.8	6.7	1.02



Figure 3. Herse à pointes avec châssis modulaires de 1.5 m de large chacun pouvant être ajustés indépendamment (Photo : P. Bàrberi).

SOLARISATION DU SOL

La solarisation du sol est une méthode préventive qui exploite la chaleur du soleil pour tuer les semences des mauvaises herbes et de ce fait réduire leur émergence. Cette méthode n'est que brièvement expliquée ici car il est traité de façon plus exhaustive dans un autre chapitre de cette publication.

Une forte température du sol, si elle dure assez longtemps, est capable de tuer les structures de reproduction des ravageurs, des maladies, et des mauvaises herbes. La solarisation peut être définie comme une méthode de désinfection du sol qui exploite l'énergie solaire disponible pendant les périodes de forte chaleur de l'année. Pour augmenter le plus possible l'effet de la solarisation, la surface du sol doit être unie, et doit contenir assez d'eau pour favoriser le transfert d'eau en profondeur dans le profil et rendre les structures de reproduction des ravageurs, des maladies, et des mauvaises herbes plus sensibles aux dommages de la chaleur. Pour cette raison, en préalable à la solarisation, le sol est souvent arrosé et couvert d'un film plastique pour accroître l'échauffement du sol et éviter la dispersion de la chaleur dans l'atmosphère.

La réussite de la solarisation du sol comme méthode de contrôle des mauvaises herbes ne dépend pas de la valeur actuelle du pic de température atteint dans le sol, mais plutôt de la durée de température au dessus d'un certain seuil (45°C) sur une base journalière (Horowitz et al. 1983). Il s'ensuit que la solarisation du sol peut être seulement utilisée dans les climats chauds ou sous serre dans une ambiance de température chaude et dans les climats méditerranéens. Par exemple, une réduction significative de l'émergence des mauvaises herbes a été observée sur plus de 12 mois après un mois de solarisation dans un tunnel de serre utilisé pour la production de cultures maraîchères en Italie Centrale (Temperini *et al.* 1998). Pour retenir le plus possible l'effet de la solarisation sur le contrôle des mauvaises herbes, le sol ne doit pas être cultivé postérieurement car autrement, les semences des mauvaises herbes présentes dans les couches profondes (peu affectés par la chaleur) sont ramenées en surface et peuvent germer.

GESTION DES SYSTEMES D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE

Un choix judicieux et une maintenance des systèmes d'irrigation et de drainage sont une importante mesure préventive pour réduire en champ l'infestation par les mauvaises herbes. Des nettoyages périodiques de la végétation des mauvaises herbes installées le long des digues préviennent l'invasion du champ. Là où il est économiquement réalisable, la substitution des digues par des drains souterrains élimine une source potentielle d'infestation de mauvaises herbes. L'utilisation de systèmes d'irrigation localisés (par exemple filet) favorise le développement des cultures au détriment des mauvaises herbes (Berkowitz, 1998). A l'opposé, un système d'irrigation à large échelle favorise souvent les mauvaises herbes parce que plusieurs d'entre elles ont une plus grande efficience que les cultures pour l'utilisation de l'eau (production de biomasse sèche par unité d'eau utilisée pour l'évapotranspiration).

GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE

Le sarclage des résidus de récolte stimule la germination et l'émergence des semences des mauvaises herbes ce qui est intéressant car, il réduit leur banque de semences. Cependant, il faudrait faire attention pour empêcher les mauvaises herbes émergées de produire des semences, pouvant réapprovisionner les réserves de semences du sol. L'arrachage des souches après la récolte peut être négatif dans les environnements caractérisés par un fort taux de minéralisation de la matière organique du sol. Dans ces cas, il vaut mieux ne pas perturber le sol ou alors couper en morceaux les résidus et les éparpiller le plus uniformément que possible à la surface du sol pour étouffer les mauvaises herbes germant dans la couche inférieure. C'est le même effet que celui qu'on espère des plantes de couverture quand elles sont utilisées comme du paillis non vivant. Bien que les semences de plusieurs espèces de mauvaises herbes peuvent être dévitalisées par le brûlage des souches, cette technique est à proscrire à cause de son effet négatif sur la réserve de matière organique du sol.

LES METHODES CULTURALES

Date de semis et disposition spatiale

Dans certains cas, la modification de la date de semis, de la densité et de la disposition spatiale peuvent réduire l'émergence des mauvaises herbes et/ou accroître l'aptitude des cultures à la compétitivité (Mohler, 1996), bien que, cet effet soit très dépendant des espèces de cultures et de l'environnement. Spandl et al. (1998) ont observé que comparé au semis de blé d'automne, le contrôle de *Setaria viridis* dans le semis de céréales au printemps était favorisé car les mauvaises herbes ont émergé en une seule vague au lieu de plusieurs, étant ainsi plus vulnérables aux méthodes de contrôle direct (herbicides ou sarclo binage). Dans de pareils cas, la date de semis peut être utilisée par le producteur comme une méthode de gestion des mauvaises herbes. Dans d'autres cultures (par exemple, pois grimpant, pomme de terre), une augmentation de la densité de semis peut se transformer en une forte aptitude à la compétition contre les mauvaises herbes, mais ceci va souvent au détriment du rendement à cause d'une forte compétition intra spécifique entre les plantes de pois (Lawson et Topham, 1985), ou une moindre qualité des tubercules et une susceptibilité accrue de la pomme de terre aux maladies (Litterick *et al.* 1999).

A l'opposé, pour les cultures présentant une forte plasticité phénotypique, la modification de la densité de semis et/ou de la disposition spatiale doit avoir de fortes chances d'être exploitées dans les stratégies de gestion des mauvaises herbes. Ceci pourrait être le cas de *Vicia faba* var. *minor,* un légume qui convient aux environnements Méditerranéens qui à la fois est une source de protéine pour l'alimentation des animaux et une plante améliorante. *V. faba* peut être semée dans des rangs serrés (environ 15 cm) ou dans des rangs beaucoup plus espacés (40-70 cm). Dans le premier cas, le nombre de gousses et de grains récoltés par plante décroît et la hauteur d'insertion des gousses sur la tige augmente (ce qui réduit les pertes de récolte résultant de la récolte

mécanique), mais le rendement de graines récoltés par unité de surface et la teneur en protéine brute sont encore bons (Bonari et Macchia, 1975). Grâce à cette plasticité phénotypique, il est fort probable que la disposition spatiale de cette culture puisse être davantage optimisée, par exemple, en la semant en lignes jumelées et en utilisant des interlignes (environ 40 à 50 cm) qui permettent des sarclages entre les lignes, permettant ainsi d'atteindre un meilleur niveau de contrôle des mauvaises herbes.

L'utilisation de transplants au lieu de semences (par exemple dans les cultures légumières) augmente aussi la compétitivité des cultures car elle augmente le différentiel de développement entre les cultures et les mauvaises herbes à l'avantage des cultures. En plus, l'utilisation de transplants peut augmenter la sélectivité (c'est à dire ratio entre dommage aux mauvaises herbes et aux cultures) des désherbeurs à torsion (Figure 4) qui sont des outils mécaniques simples et peu coûteux pour le contrôle des mauvaises herbes dans les interlignes (Melander, 2000). Dans les betteraves sucrières par exemple, le contrôle mécanique des mauvaises herbes peut être déjà exécuté cinq jours après la transplantation, avec très peu de dommage aux cultures. Un possible effet secondaire négatif de l'utilisation de transplants de betterave sucrière est la forte incidence de la bifurcation des racines qui peuvent décroître la qualité du produit. Comparé au semis direct, l'utilisation de transplants augmente souvent les coûts de production et les besoins en main d'œuvre.



Figure 4. Désherbeurs à torsion, c'est à dire fourchons à ressorts qui peuvent être couplés avec des outils de sarclage pour permettre le contrôle des mauvaises herbes entre les lignes (Photo P. Bàrberi).

Le choix du génotype

Différents génotypes de la même culture possèdent des traits qui peuvent contribuer à une aptitude plus forte ou plus faible à la compétition contre les mauvaises herbes. Ces traits sont typiquement ceux en relation avec une rapide émergence des plantules, un rapide établissement de la végétation (Rasmussen et Rasmussen, 2000), et de forts taux de croissance dans les premiers stades. L'utilisation de ces génotypes peut de ce fait réduire les besoins pour les mesures de contrôle direct des mauvaises herbes (par exemple herbicides, ou le sarclage).

Le potentiel de sélection des génotypes avec des traits compétitifs a été démontré dans les accessions de blé australiennes, bien que l'expression des avantages à la compétition au champ est fortement influencée par les conditions environnementales (Lemerle *et al.* 2001).

Ce n'est pas tous les traits qui donnent aux cultures des avantages compétitifs contre les mauvaises herbes qui peuvent être exploités; par exemple, la taille du plant, qui est souvent corrélée avec la suppression des mauvaises herbes ((Benvenuti et Macchia, 2000), est souvent négativement corrélée avec le rendement et positivement corrélée à la sensibilité à la verse.

Une forte compétitivité génotypique peut aussi être liée à la production et à la libération de substances allélochimiques qui inhibent l'émergence et la croissance des mauvaises herbes. Olofsdotter (2001) a montré que certaines variétés de riz sont capables d'exercer une activité allélopatique considérable contre les mauvaises herbes, et par conséquent il existe une potentialité dans l'utilisation du choix des génotypes de culture comme méthode culturale pour la gestion des mauvaises herbes dans le riz.

Les plantes de couverture (utilisées comme paillis vivant)

Les plantes de couverture peuvent aussi être utilisées comme du paillis vivant, c'est à dire, qu'elles peuvent être cultivées ensemble avec une culture de rente, souvent en lignes alternées. Dans ce cas, les avantages des plantes de couverture portent principalement sur une suppression accrue des mauvaises herbes et la conservation de l'humidité du sol. Toutefois, il est vraiment important d'éviter la compétition entre la culture de rente et le paillis vivant. Pour ce faire, la croissance du paillis vivant doit souvent être sous contrôle par fauchage ou par des doses sub-létales d'herbicides, pour éviter une trop forte compétition du paillis avec la culture de rente (Figure 5). Pour ce faire, la gestion du paillis vivant n'est pas facile, et la commodité de cette méthode est douteuse dans des environnements où les compétitions pour la lumière et l'eau peuvent être substantielles.

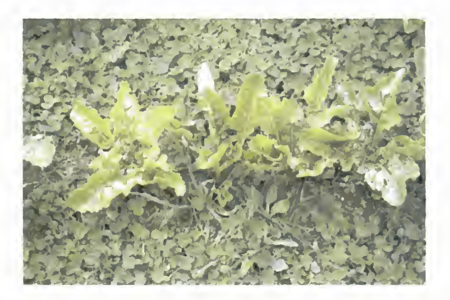


Figure 5. Paillis vivant entre la betterave sucrière et le trèfle souterrain (*Trifolium subterraneaum*). En haut : bon développement du paillis vivant, en bas développement excessif du paillis vivant (Photo: P. Bàrberi).

Les associations culturales

Une autre méthode culturale pour accroître l'aptitude des plantes à lutter contre les mauvaises herbes est l'association culturale. Comme les plantes de couverture, les associations augmentent la diversité écologique dans un champ. En plus, elles augmentent l'utilisation des ressources naturelles par la végétation et, comparée à la culture pure, elles rivalisent mieux avec les mauvaises herbes pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs (Liebman et Dyck, 1993). Par exemple, comparé à la culture pure, l'association poireau - céleri ligne par ligne diminue

d'environ 45 % la couverture relative du sol par les mauvaises herbes, réduit la densité et la biomasse de *Senecio vulgaris* de 58 % et 98 % respectivement et augmente le rendement global d'environ 10 % (Baumann *et al.* 2000). L'augmentation de la suppression des mauvaises herbes et du rendement a été aussi démontrée dans plusieurs environnements pour les associations céréales - légumineuses (Ofori et Stern, 1987). Comme dans le cas du paillis vivant, la réussite des associations culturales repose sur un bon équilibre entre les besoins des espèces en présence pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs, qui accroît l'utilisation complémentaire des ressources et réduit la compétition entre les cultures associées. Dans la pratique, ceci signifie l'optimisation de la disposition spatiale de l'association, des densités relatives la croissance relative des plantes au cours du temps dans n'importe quel environnement donné (Ofori et Stern, 1987).

Fertilisation

Une fumure azotée de pré-semis peut augmenter l'aptitude des plantes à rivaliser avec les mauvaises herbes dans les cultures ayant de forts taux de croissance aux stades initiaux, mais cet effet est modulé par le type de mauvaises herbes présentes dans le champ. Par exemple, dans le tournesol cultivé en conditions méditerranéennes une application en pré-semis d'azote synthétique a augmenté la suppression des mauvaises herbes à émergence tardive comme *Chenopodium album*, *Solanum nigrum* et *Xanthium strumarium* comparativement à l'application fractionnée, c'est à dire, 50 % en pré-semis et 50 % en entretien (Paolini *et al.* 1998). A l'opposé, la même technique donne un avantage compétitif pour les mauvaises herbes à émergence précoce comme *Sinapis arvensis*. Similairement, une anticipation ou un retard de l'application de l'azote d'entretien sur la betterave sucrière augmente l'aptitude de la culture à établir la compétition avec une dominance des mauvaises herbes à émergence tardive et précoce, respectivement (*Paolini et al. 1999*).

La modulation des interactions culture- mauvaises herbes à travers la fertilisation des cultures n'est pas faisable quand les fertilisants ou les amendements organiques (fumier) sont utilisés, à cause de la libération très lente des éléments nutritifs en provenance de ces sources. Cependant, l'application de fertilisants (synthétiques ou organiques) tout au long, ou à proximité de la ligne de culture peut améliorer la gestion des mauvaises herbes car elle accroît les chances relatives de la culture à capter les éléments nutritifs (surtout N) au détriment des mauvaises herbes (Rasmussen, 2000).

CONCLUSIONS

Les producteurs ont plusieurs méthodes de lutte préventives et culturales dans leur arsenal qu'ils peuvent mettre ensemble pour bâtir une bonne stratégie de gestion des mauvaises herbes. La convenance de l'utilisation d'une méthode au lieu d'une autre dépend des attitudes locales et des contraintes comme la disponibilité d'argent et de main d'œuvre, l'accès aux moyens techniques (par exemple semences, fertilisants, herbicides), les caractéristiques environnementales, sociales et économiques qui peuvent limiter la gamme des choix agronomiques (par exemple durée de la campagne agricole, les répartitions de la pluie et de la température, taux de minéralisation du sol, structure de la ferme et du marché, héritage culturel, existence de services de conseil, etc.). Cependant, une plus forte diversification des systèmes culturaux (c'est à dire séquence des cultures et pratiques culturales associées) basée sur les principes agro-écologiques est la clé pour une gestion efficace à long terme des mauvaises herbes dans n'importe quelles situations. A cet égard, l'introduction systématique des méthodes préventives et culturales de gestion des mauvaises herbes doit être toujours poursuivie. Ceci évidemment implique que les fermiers doivent être formés pour acquérir un haut niveau de connaissance et de compétences techniques. Des solutions simples comme la monoculture et le recours aux herbicides comme la seule méthode de contrôle directe des mauvaises herbes peuvent être couronnées de succès à court terme, mais ne sont jamais payantes à long terme.

BIBLIOGRAPHIE

Bàrberi, P., Bonari, E. & Mazzoncini, M. 2001. Weed density and composition in winter wheat as influenced by tillage systems. In *Proc. 1st World Congress on Conservation Agriculture*, Madrid (Spain), 1-5 October, 451-455.

Bàrberi, P. & Lo Cascio, B. 2001. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition. *Weed Res.* 41: 325-340.

Bàrberi, P. & Mazzoncini, M. 2001. Changes in weed community composition as influenced by cover crop and management system in continuous corn. *Weed Sci.* 49: 491-499.

Baumann, D.T., Kropff, M.J. & Bastiaans, L. 2000. Intercropping leeks to suppress weeds. *Weed Res.* 40: 359-374.

Benvenuti, S. & Macchia, M. 2000. Role of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) canopy height on *Sinapis arvensis* L. growth and seed production. In *Proc. XIème Colloque Intl. sur la Biologie des Mauvaises Herbes*, Dijon, France. pp.305-312.

Berkowitz, A.R. 1988. Competition for resources in weed-crop mixtures. In *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches.* eds. Altieri, M.A. & Liebman, M. 89-119, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Blum, U., King, L.D., Gerig, T.M., Lehman, M.E. & Worsham, A.D. 1997. Effects of clover and small grain cover crops and tillage techniques on seedling emergence of some dicotyledonous weed species. *American J. of Alternative Agriculture* 4: 146-161.

Bonari E. & Macchia, M. 1975. Effetto dell'investimento sulla produzione del favino (*Vicia faba* L. var. minor Peterm Beck). *Rivista di Agronomia* 9: 416-423 (in Italian with English abstract).

Cardina J., Regnier, E. & Harrison, K. 1991. Long-term tillage effects on seed banks in three Ohio soils. *Weed Sci.* 39: 186-194.

Cousens, R. & Mortimer, M. 1995. *Dynamics of weed populations*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 332 pp.

Froud-Williams, R.J. 1983. The influence of straw disposal and cultivation regime on the population dynamics of *Bromus sterilis*. *Annals of Applied Biology* 103: 139-148.

Froud-Williams, R.J. 1988. Changes in weed flora with different labourage and agronomic management systems. In *Weed Management in Agro-ecosystems: Ecological Approaches,* eds. Altieri, M.A. & Liebman, M., 213-236, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Gallandt E.R., Libeman, M. & Huggins, D.R. 1999. Improving soil quality: implications for weed management. In *Expanding the Context of Weed Management,* ed. Buhler, D.D. 95-121. The Haworth Press, New York, USA.

Horowitz, M., Regev, Y. & Herzlinger, G. 1983. Solarization for weed control. *Weed Sci.* 31: 170-179.

Jordan, N.R., Zhang, J. & Huerd, S. 2000. Arbuscular-mychorrhizal fungi: potential roles in weed management. *Weed Res.* 40: 397-410.

Karlen, D.L., Varvel, G.E., Bullock, D.G. & Cruse, R.M. 1994. Crop rotations for the 21th century. *Advances in Agronomy* 53: 1-45.

Lal, R., Regnier, E., Eckert, D.J., Edwards, W.M. & Hammond, R. 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. In *Cover Crops for Clean Water*, ed. Hargrove, W.L., pp.1-11. Soil and Water Conservation Society Publication, Ankey, USA.

Lawson, H.M. & Topham, P.B. 1985. Competition between annual weeds and vining peas grown at a range of population densities: effects on the weeds. *Weed Res.* 25: 221-229.

Lègère, A., Samson, N. & Rioux, R. 1993. Perennial weeds in conservation labourage systems: more of an issue than in conventional labourage systems? In *Proc. 1993 Brighton Conference - Weeds*, 747-752.

Lemerle, D., Verbeek, B. & Orchard, B. 2001. Ranking the ability of wheat varieties to compete with *Lolium rigidum*. *Weed Res.* 41: 197-209.

Liebman, M. & Davis, A.S. 2000. Integration of soil, crop, and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Res.* 40: 27-47.

Liebman, M., Drummond, F.A., Corson, S. & Zhang, J. 1996. Labourage and rotation crop effects on weed dynamics in potato production systems. *Agronomy J.* 88: 18-26.

Liebman, M. & Dyck, E. 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications* 3: 92-122.

Litterick, A.M., Redpath, J., Seel, W. & Leifert, C. 1999. An evaluation of weed control strategies for large-scale organic potato production in the UK. In *Proc. 1999 Brighton Conference – Weeds*, Brighton, UK. 951-956.

Melander, B. 2000. Mechanical weed control in transplanteed sugar beet. In *Proc. of the 4th Workshop of the EWRS Working Group on Physical and Cultural Weed Control*, Elspeet The Netherlands, 25.

Mohler, C.L. 1996. Ecological bases for the cultural control of annual weeds. *J.of Production Agriculture* 9: 468-474.

Mohler, C.L. & Teasdale, J.R. 1993 Response of weed emergence to rate of *Vicia villosa* Roth and *Secale cereale* L. residue. *Weed Res.* 33: 487-499.

Ofori, F. & Stern, W.R. 1987. Cereal-legume intercropping systems. *Advances in Agronomy* 41: 41-90.

Olofsdotter M. 2001. Rice – a step toward use of allelopathy. *Agronomy J.* 93: 3-8.

Paolini, R., Principi, M., Del Puglia, S. & Lazzeri, L. 1998. Competitive effects between sunflower and six broad-leaved weeds. In *Proc. 6th EWRS Mediterranean Symposium*, Montpellier, France, 81-88.

Paolini, R., Principi, M., Froud-Williams, R.J., Del Puglia S. & Biancardi, E. 1999. Competition between sugarbeet and *Sinapis arvensis* and *Chenopodium album*, as affected by timing of nitrogen fertilization. *Weed Res.* 39: 425-440.

Rasmussen K. 2000. Can slurry injection improve the selectivity of weed harrowing in cereals? In *Proc. of the 4th Workshop of the EWRS Working Group on Physical and Cultural Weed Control*, Elspeet, The Netherlands, 33-34.

Rasmussen, K. & Rasmussen, J. 2000. Barley seed vigour and mechanical weed control. *Weed Res.* 40: 219-230.

Spandl E., Durgan, B.R. & Forcella, F. 1998. Labourage and planteing date influence foxtail (*Setaria* spp.) emergence in continuous spring wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Tech.*12, 223-229.

Spandl, E., Durgan, B.R. & Forcella F. 1999. Foxtail (*Setaria* spp.) seedling dynamics in spring wheat (*Triticum aestivum*) are influenced by seeding date and labourage regime. *Weed Sci.* 47: 156-160.

Teasdale, J.R. & Mohler, C.L. 1993. Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye. *Agronomy J.* 85: 673-680.

Teasdale, J.R & Mohler, C.L. 2000. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches. *Weed Sci.* 48: 385-392.

Temperini, O., Bàrberi, P., Paolini, R., Campiglia, E., Marucci, A. & Saccardo, F. 1998. Solarizzazione del terreno in serra-tunnel: effetto sulle infestanti in coltivazione sequenziale di lattuga, ravanello, rucola e pomodoro. In *Proc. XI SIRFI Biennial Congress*, Bari, Italy. 12-13 November, 213-228 (Italian, with English abstract).

Van Der Weide, R.Y., Bleeker, P.O. & Lotz, L.A.P. 2002. Simple innovations to improve the effect of the false seed bed technique. In *Proc. of the 5th Workshop of the EWRS Working Group on Physical and Cultural Weed Control*, Pisa, Italy. 3-4.

Zanin, G., Otto, S., Riello L. & Borin, M. 1997. Ecological interpretation of weed flora dynamics under different labourage systems. *Agriculture Ecosystems & Environment* 66: 177-188.

L'importance de l'allélopathie dans la sélection de nouveaux cultivars

Kil-Ung Kim et Dong-Hyun Shin

INTRODUCTION

L'allélopathie est définie comme l'influence directe d'une substance chimique libérée par une plante sur la croissance et le développement d'une autre. Il est connu que les substances allélopathiques sont induites par des stress environnementaux comme il est montré dans la figure 1. Les composés allélopathiques peuvent être libérés dans l'environnement par les plantes par les exsudats racinaires, le lessivage, la volatilisation, la décomposition des résidus de plantes dans le sol (Figure 1). Les substances allélopathiques si elles sont présentes dans les variétés de cultures, peuvent réduire le besoin de gestion des mauvaises herbes, particulièrement l'utilisation d'herbicides. L'allélopathie à elle seule pourrait ne pas être une technologie parfaite de gestion des mauvaises herbes, mais elle peut être un outil additionnel pour le contrôle des mauvaises herbes. Il est extrêmement difficile de démontrer l'allélopathie dans la nature à cause de la complexité de l'interférence qui inclut des effets négatifs, positifs et neutres des plantes les unes sur les autres (Christensen, 1993). L'interférence est une combinaison des processus de compétition pour les ressources et la production de composés allélopathiques qui suppriment les compétiteurs (Duke *et al.* 2001). Ainsi, l'allélopathie diffère de la compétition pour les ressources. Les recherches sur l'allélopathie ont été conduites depuis plusieurs décennies, mais les connaissances disponibles sont très limitées. Une amélioration au niveau des cultivars est la seule piste qui n'a pas été exploitée à une grande échelle comme une stratégie de gestion des mauvaises herbes (Khush, 1996). La possibilité de l'incorporation de traits d'allélopathie dans les cultivars améliorés de riz, ce qui réduirait le besoin d'utilisation d'herbicides sur cette culture, mérite d'être explorée. Bien sûr, jusqu'ici aucun cultivar portant des propriétés allélopathiques n'a été créé (Duke *et al.* 2001).

Récemment, une attention particulière a été portée sur le potentiel allélopathique du riz depuis que Dilday *et al.* (1991) ont identifié des cultivars de riz exhibant des potentiels allélopathiques contre la salade de canards (*Heteranthera limosa* (Sw). Wild. En plus, le potentiel allelopathique a été aussi décrit sur un nombre élevé de culture comme l'orge (Lovett et Hoult, 1995); le concombre (Putam et Duke, 1974); l'avoine (Fay et Duke, 1977); le riz (Dilday et al. 1998); le sorgho (Nimbal et al. 1998); le tournesol (Leather, 1983); le tabac (Patrick et al. 1963) et le blé (Wu et al. 1999).

Bien que l'approche de la création variétale seule ne peut pas surmonter le problème des mauvaises herbes, une augmentation du potentiel allélopathique des variétés de riz aura un impact certain à la fois sur les systèmes culturaux à faibles intrants et à forte utilisation d'intrants. Bien plus, la technologie basée sur l'allélopathie est aussi plus facilement transférable aux producteurs dans les systèmes de gestion à faibles intrants que dans les systèmes de gestion à forte utilisation d'intrants, qui imposent une forte utilisation d'herbicides. Il y a trois excellentes revues de littérature sur ce sujet : l'une est sur les stratégies pour accroître le contrôle des mauvaises herbes par la production d'allélochimiques par manipulation génétique (Duke *et al.* 2001) ; les deux autres revues sont écrites par Olofsdotter (2001a, 2001b) sur l'allélopathie du riz.

Ce chapitre discutera brièvement l'importance de la création de cultures allelopathiques, en se focalisant sur les traits allélopathiques, les méthode de mesure de la différence génétique, les allélochimiques identifiées, et une méthode introductive sur comment créer des cultures allélopathiques. Le riz était utilisé comme plante modèle, mais il semblerait que les principes décrits sont applicables à n'importe quelle autre plante.

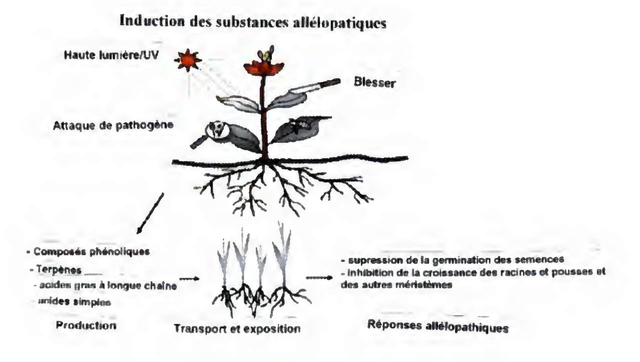


Figure 1. Induction de substances allélochimiques par les stress environnementaux

IMPORTANCE DE L'ALLELOPATHIE DANS LA CREATION DE NOUVEAUX CULTIVARS

La recherche récente sur l'allélopathie du riz a fait progresser la possibilité de créer du riz allélopathique pour les raisons suivantes :

- Il existe une variation dans l'allélopathie parmi les cultivars de riz.
- L'allélopathie joue un rôle dans les conditions de champ.
- Le riz allélopathique est efficace aussi bien sur les mauvaises herbes monocotylédones que dicotylédones.
- L'identification des substances allélochimiques du riz a remarquablement progressé.
- Des loci quantitatifs (QTL) corrélé avec l'allélopathie ont été déterminés (Olofsdotter, 2000 b).

Un certain nombre de cultivars de riz ou d'accessions ayant un potentiel allélopathique ont été identifiés en différents lieux (Dilday *et al.* 1991; Fujii, 1992 : Kim et Shin, 1998, Olofsdotter *et al.* 1999). Cependant, aucun cultivar commercial de riz allélopathique n'a été encore créé. A cet égard, le problème maintenant est comment utiliser ce potentiel allélopathique dans les programmes de création variétale. Deux effets importants peuvent être espérés de la création de cultures allélopathiques.

Importance écologique

Dans tous les écosystèmes de riz, les herbicides sont devenus l'une des composantes les plus importantes dans le contrôle des mauvaises herbes. Il y a deux raisons pour expliquer l'utilisation accrue d'herbicides, la première étant la large adoption de cultivars à haut rendement qui ont créé des stimulants économiques au niveau des producteurs pour réduire l'infestation des mauvaises herbes; et la seconde est la disponibilité d'herbicides peu coûteux indiquant que le coût de contrôle des mauvaises herbes par des herbicides dans le riz irrigué est moins que le cinquième du coût d'un simple arrachage manuel des mauvaises herbes dans l'Illoilo, Philippines (Moody, 1991). Des situations similaires existent dans l'Ouest de Java, en Indonésie et dans le Delta Mekong, Vietnam (Pandy et Pingali, 1996).

A cause de la disponibilité d'herbicides à moindre coût, il est espéré que l'utilisation d'herbicides continuera à augmenter, aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement où, les herbicides sont actuellement utilisés avec modération et les salaires au niveau des fermes relativement faibles. Cependant, ceci n'indique pas un manque d'importance pour le sarclage manuel. Le sarclage manuel demeure la méthode dominante de contrôle des mauvaises herbes dans plusieurs endroits d'Asie, puisque les options de gestion pour le contrôle des mauvaises herbes sont limitées sous diverses conditions agro-écologiques. (Kim, 2000).

Tous les herbicides recommandés et communément utilisés sont reconnus être sans danger, non seulement pour l'homme et les animaux, mais aussi pour l'environnement quand ils sont bien utilisés. Les d'herbicides du type sulfonylurée ont été intensivement utilisés dans l'Extrême - Orient Asiatique depuis 1990 à cause de leur grande efficacité contre un large spectre de mauvaises herbes du riz paddy même à des doses extrêmement faibles. Toutefois, une application intensive et répétée de ce type d'herbicide a produit plusieurs effets négatifs cités ci-dessous:

- développement de mauvaises herbes résistantes (Valverde *et al.* 2000);
- effets résiduels sur les cultures suivantes;
- disparition de quelques mauvaises herbes susceptibles comme *Brasenia schreberi* et *Sagittaria aginashi*, ce qui affecte la biodiversité des mauvaises herbes (Itoh, 2000).

Un autre élément important est que la culture de riz en Asie est intimement liée à la pisciculture et l'eau d'irrigation utilisée à d'autres fins. Pour éliminer la pollution de molinate et de thiobencarb de l'eau de boisson, plus de 600.000$US ont été dépensés pour l'assistance seulement afin de mettre en œuvre le système de récupération d'eau dans la production de riz en Californie (Hill *et al.* 1977). Ceci fut un choc pour les producteurs de riz tout comme les consommateurs, suggérant avec force, un besoin urgent de surveiller le mouvement des herbicides et la pollution des champs de paddy, des fleuves, de tous les systèmes aquatiques et même des organismes non-cibles.

Tous ces facteurs peuvent fournir des raisons suffisantes pour attirer l'attention du public et les inquiétudes sur les effets négatifs des herbicides pouvant provenir d'une application intensive d'herbicide dans l'environnement. A cet égard, on a besoin de trouver une solution alternative à cette forte dépendance vis à vis des herbicides. Cette solution peut être trouvée dans l'utilisation de l'allélopathie, laquelle peut réduire l'utilisation d'herbicides dans les systèmes de culture à base de riz.

Importance économique

L'utilisation de cultures allélopathique peut définitivement réduire le coût de contrôle des mauvaises herbes. Cette technologie (allélopathie) basée sur les semences est plus facilement

transférable aux systèmes de gestion à faibles intrants qui prévalent dans plusieurs systèmes de cultures à base de riz en Asie.

Dans le souci de mettre en œuvre cette technologie, des problèmes anticipés comme l'autotoxicité, l'effet résiduel des cultivars allélopathiques et la tolérance de la population des mauvaises herbes suite à l'utilisation répétée de cultures allélopathiques dans les mêmes champs doivent être étudiés avant que les cultivars allélopathiques ne soient mis à la disposition des producteurs. L'établissement d'un système approprié de gestion des mauvaises herbes peut sûrement aider à surmonter ces effets négatifs.

TRAITS ALLELOPATHIQUES

Quels sont les traits allélopathiques? Les caractéristiques morphologiques comme l'émergence précoce des plantules, la vigueur des plantules, de forts taux de croissance qui produisent une végétation dense, une hauteur plus grande des plantes, un volume des racines plus grand et une plus longue durée de cycle sont connus pour accroître l'aptitude des cultivars de riz à établir la compétition avec les mauvaises herbes (Minotti et Sweet, 1981, Bekowitz, 1988). La hauteur des plantes est souvent décrite comme un des facteurs les plus importants dans l'aptitude totale d'une culture à la compétition et intervient à un pourcentage similaire de l'aptitude totale à la compétition (Gaudet et Keddy, 1988; Garrity *et al.* 1992). Cependant, il n'est pas certain que toutes ces caractéristiques soient liées à l'allélopathie.

Comment pouvons nous mesurer les effets allélopathiques? S'il n'existe pas de caractéristique spécifique, les caractéristique les plus visibles sur la plante comme la hauteur, la longueur des racines et le poids sec des plantes expérimentées peuvent être utilisés comme des paramètres mesurables pour évaluer le potentiel allélopathique. Pour créer de nouvelles cultures allélopathiques, la première des choses est d'identifier les accessions ou cultivars allélopathiques. Pour identifier les cultivars allélopathiques, une méthode efficace de criblage qui peut tester facilement et rapidement un grand nombre d'accessions dans un espace limité à coût réduit, et reproductible rapidement doit être mise au point.

Méthodes de criblage

Pour cribler le potentiel allélopathique du riz, plusieurs méthodes comme la méthode de "pas d'escalier" (de l'anglais "stairstep") (Bonner, 1950; Liu et Lovett, 1993), le test de culture hydroponique (Einhelig, 1985), la technique de semis en relais (Navarez et Olofsdotter, 1996), le test sur milieu agar (Fujii, 1992; Wu *et al.* 1999), analyse de groupement avec utilisation de HPLC (Mattice *et al.* 2001), méthode d'extraction à l'eau (Kim *et al.* 1999; Ebana *et al.* 2001) et "bioessai du plateau à 24 puits" (Rimando *et al.* 1998) ont été suggérées. Chacune de ces méthodes peut être utilisée comme un outil valable pour évaluer le potentiel allélopathique. Toutefois, il a été aussi observé que les accessions ou cultivars criblés par une méthode peuvent ne pas être toujours actifs par une autre méthode. En terme de criblage, le test direct en champ pourrait être la meilleure méthode pour évaluer le potentiel allélopathique, mais il présente plusieurs difficultés lorsqu'il faut traiter plusieurs germplasmes. Ainsi, ce dont on a vraiment besoin est une méthode sûre et universelle de bioessai qui donne les mêmes tendances sous différentes conditions. Pour cette raison, il est nécessaire de poursuivre les recherches pour trouver un système de criblage plus sûr.

VARIABILITE GENETIQUE

Différent potentiel allélopathique

Dilday et al. (1998) ont identifié 412 accessions ayant des potentiels allélopathiques contre "la salade de canards" [*Heteranthera limosa* (Sw.) Willd] parmi 12.000 accessions en provenance de 31 pays différents. Ces accessions sont génétiquement très différentes, indiquant que le potentiel allélopathique est très présent dans le germplasme du riz. Un nombre d'études a été conduit pour évaluer le potentiel allélopathique des germplasmes de riz. Une large variabilité dans le potentiel allélopathique parmi les cultivars de riz a été décrite comme existant dans les germplasmes. Bien plus, il est supposé que le potentiel allélopathique puisse être contrôlé par plusieurs gènes parce que montrant une variation continue dans le germplasme. De plus, le potentiel allélopathique est souvent attribué à plusieurs inhibiteurs qui sont supposés agir de façon additive ou synergique plutôt que de façon isolée (Courtois et Olofsdotter, 1998). Les variétés tropicales de riz *japonica* ont été montrées comme ayant plus de potentiel allélopathique contre les mauvaises herbes que les autres variétés de riz, surtout contre *Echinochloa* spp. (Jensen *et al.* 2001).

Analyse quantitative des caractéristiques des loci

Il existe des connaissances très limitées dans la génétique de l'allélopathie. Bien plus, aucun effort de n'a été fait pour améliorer génétiquement le potentiel allélopathique des cultures à cause de notre faible connaissance de ce phénomène. A cet effet, les travaux récents conduits par Jensen *et al.* (2001) semblent être très valables. La cartographie des traits quantitatifs de loci (QTL) utilisant 142 marqueurs d'ADN ont été localisés dans 142 lignées recombinantes obtenues à partir de croisements entre le cultivar IAC 165 (variété *japonica* de plateau) qui a un fort potentiel allélopathique et le cultivar CO 39 (variété irriguée *indica*) qui a un faible potentiel allélopathique. Trois principaux loci, chacun comptant pour environ 10 % de –la régulation à la hausse la production d'allélochimiques étaient localisés sur les chromosomes 2 et 3 du riz. Les deux traits QTL sur le chromosome 3 étaient intimement liés, ainsi, ils pourraient être facilement manipulés. Bien que les QTLs pour l'effet allélopathique contre le Pied-de Coq [*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv] ont été identifiés, les types de gènes responsables pour l'effet allélopathique et la production de substances allélochimiques n'est pas présentement connu.

LES ALLELOCHIMIQUES DU RIZ

Synthèse des allélochimiques affectée par les stress environnementaux. Jusqu'à récemment, plusieurs études ont vérifié les mécanismes des systèmes d'auto défense incluant l'allélopathie des plantes, plus particulièrement le métabolisme des phenylpropanoides (Figure 2) et des isoterpenoides (Figure 3). Les plantes répondent aux stress environnementaux à travers des réactions biochimiques variées, qui peuvent fournir une protection contre les agents causaux. L'augmentation des composés allélopathiques phénoliques et terpenoides sous stress environnementaux a été bien documentée. Par exemple, une élévation de la lumière UV-B induit l'accumulation de phenylpropanoides et des flavonoides dans différentes espèces de plantes comme le haricot, le persil, la pomme de terre, la tomate, le maïs, le seigle, l'orge et le riz (Hahlbrock et Scheel 1989; Ballare *et al.* 1995; Tevini *et al.* 1991; Liu *et al.* 1995; Kim *et al.* 2000a).

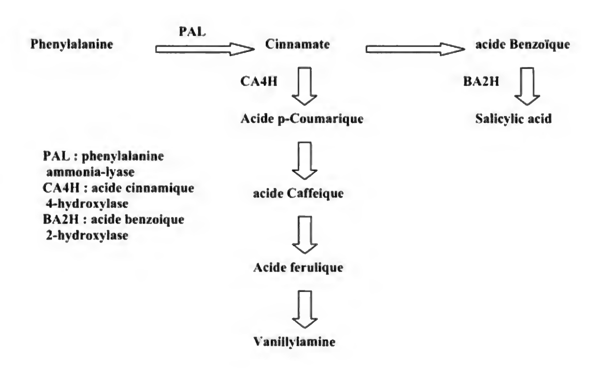


Figure 2. Schéma de traces de phenylpropanoide

Voie métabolique de synthèse de substances allélochimiques
Tous les phenylpropanoides sont dérivés de l'acide cinnamique, qui est formé à partir de la phénylalanine par l'action catalytique de phenylalanine ammonia - lyase (PAL), l'enzyme qui est le point de séparation du métabolisme primaire (voie métabolique du shikimate) et du métabolisme secondaire (phenylpropanoide) (Figure 2). Il est connu que plusieurs composés phénoliques ont non seulement des aptitudes à des fonctions physiologiques, mais aussi des potentialités allélopathiques des plantes.

Les composés isoprenoides sont produits à partir d'unités isoprenoides de type C_5 et la classification de différentes familles d'isoprenoides est basée sur le nombre d'unités isoprenoïdes de type C_5 présentes dans le squelette des composés (Gershenzon et Croteau, 1993) (Figure 3). En particulier, les diterpenoides sont connus pour jouer un rôle important dans le mécanisme d'auto-défense du riz de même que dans le potentiel allélopathique. Les terpenoides jouent divers rôles fonctionnels dans les plantes comme hormones (gibberelines, acide abscisique), pigments photosynthétiques (phytol, carotenoides), transporteurs d'électrons (ubiquinone, plastophates), médiateurs d'assemblage de polysacharide (polyprenyl phosphates) et composés structuraux des membranes (phytosterols). En plus des fonctions universelles physiologiques, métaboliques et structurales, plusieurs composés terpenoides spécifiques (communément dans les familles C_{10}, C_{15}, et C_{20}) servent dans la communication et la défense. Il a été constaté que des terpenoides spécifiques induits ont été corrélés avec l'interaction plante-plante, plante-insecte, plante-pathogène.

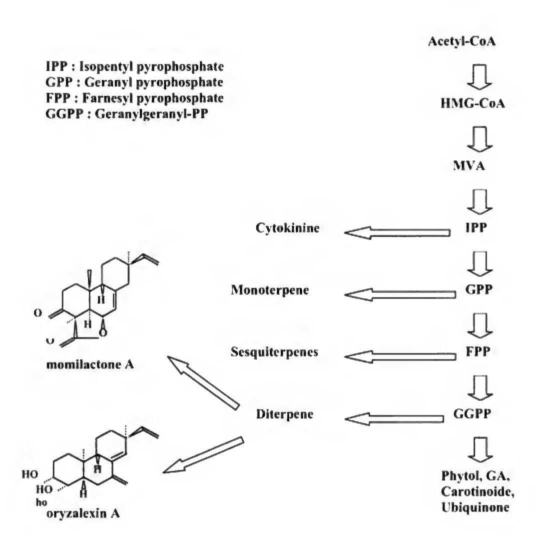


Figure 3. Schéma de la voie métabolique isoprenoide

Les allélochimiques putatifs

Il existe un nombre d'études montrant que les substances communes allélopathiques putatives trouvées dans le riz sont des composés phénoliques (Rice, 1987; Chou *et al.* 1991 Inderjit, 1996; Mattice *et al.*1998; Blum, 1998). Kim *et al.* (2000b) ont identifié de Kouketsumochi, riz à potentiel allélopathique, plusieurs composés par des analyses GC/MS comme les stérols, les benzaldehydes, les dérivées du benzène, les longues chaînes d'esters d'acide gras, les aldéhydes, les kétones et les amines issues de fractions à activité biologique. Plusieurs composés de Taichung Native 1, riz allélopathique, ont été identifiés par la méthode d'isolement à partir de bioessai (Rimando *et al.* 2001). Ce sont : acide azélaique, acide *p*-coumarique, 1*H*-indole-carboxaldehyde, acide 1*H*-indole-3-carboxylique, acide 1 *H*-indole-5-carboxylique et ester acide 1,2-benzenedicarboxylique bis (2-ethylhexyl). Parmi les substances allélopathiques identifiées, l'acide *p*-coumarique, un allélochimique connu, a inhibé la germination de la laitue (*Lactuca sativa* L.) à une concentration de 1m*M*, mais était actif contre le Pied-de-Coq [*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv] seulement à des concentrations plus fortes que 3 m*M* (Rimando *et al.* 2000). Un résultat similaire a été obtenu par Kim *et al.* (2001b) dans lequel était présent l'acide p-coumarique dans du riz potentiellement allélopathique comme Kouketsumochi, Tang Gan et Taichung Native 1. En plus, la teneur encet acide s'était remarquablement accrue par la radiation UV (Figure 4).

Ces résultats suggèrent fortement que l'acide p-coumarique puisse être un composé régulé par les stress environnementaux et joue un rôle dans l'allélopathie du riz. A l'opposé, il y a différents rapports indiquant que la concentration de l'acide phénolique seule et les combinaisons de tous les acides phénoliques déterminés dans les écosystèmes du riz n'atteignent pas des niveaux phytotoxiques (Tanaka *et al.* 1990; Olofsdotter *et al.* 2001). Ainsi, il est supposé qu'aucun allélochimique responsable de l'allélopathie du riz n'a été déterminé. A l'opposé, plus d'une substance chimique est vraisemblablement responsable de l'allélopathie dans le riz. Ainsi, l'identification des substances allélochimiques dans le riz est d'une extrême importance pour l'utilisation comme marqueurs dans l'identification et la régulation des gènes.

STRATEGIES POUR LA CREATION DE CULTURES ALLELOPATHIQUES

Les trois approches pour créer plus de cultures allélopathiques sont la méthode traditionnelle de sélection; l'incorporation de propriétés allélopathiques dans le riz hybride; et le génie génétique. Du point de vue de la création variétale, la distinction entre allélopathie et la compétition est quelque peu difficile dans le champ du paysan car l'interférence est le phénomène qui compte réellement (Courtois et Olofsdotter, 1998). A cet effet, la meilleure voie serait de créer des cultures allélopathiques ayant une forte compétitivité. Si la création de cultivars allélopathiques est réalisée, cela serait vraiment bénéfique aux agriculteurs des pays producteurs de riz.

La sélection traditionnelle

Si un nombre élevé de QTLs à faible effet sont concernés, la méthode traditionnelle de sélection peut être une solution raisonnable (Courtois et Olofsdotter, 1998). Le principe de la méthode traditionnelle de sélection pour des études génétiques est très simple. Deux parents ayant deux comportements différents sont croisés et les lignées recombinantes (RILs) sont obtenues par la méthode de la progéniture d'une –seule semence (SSD).

Cette procédure consiste à faire avancer la F_2 sans sélection pour deux ou trois générations (quelques fois quatre à cinq générations) de façon que chaque semence de F_4 ou F_5 permette de remonter à chaque plante de F_2. Une seule graine est gardée de chaque plante de chaque génération. Ceci pourra être répété pour deux ou plusieurs générations afin que plus tard les plantes ayant des caractéristiques désirées puissent être sélectionnés. Une fois qu'un degré raisonnable de fixation est obtenu, le potentiel allélopathique du RIL peut être évalué. Les semences peuvent être ensuite multipliées et testées en condition de champ pour usage comme cultivars allélopathiques.

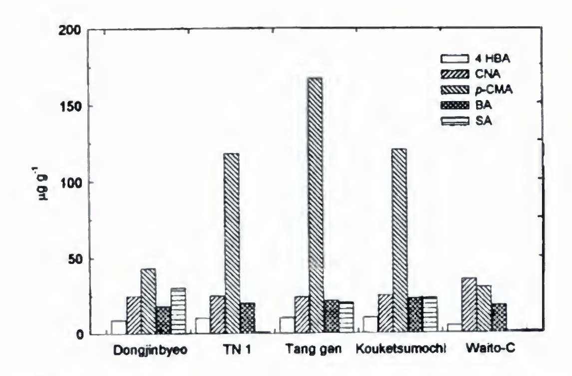


Figure 4. Composés intermédiaires dans la voie métabolique de synthèse de phenylpropanoide dans différents cultivars identifiés par le HPLC. Des extraits de feuilles de riz étaient préparés avec 10ml de méthanol et 20 ul d'échantillon traité étaient injectés dans une colonne de CLC-ODS. 4HBA : acide 4-hydroxybenzoique, CAN : acide cinamique, p-CMA : acide p-coumarique, BA : acide benzoique, SA : acide salicylique.

Un croisement entre Donginbyeo (cultivar - non allélopathique, mais à haut rendement ayant une bonne qualité) et Kouketsumochi (cultivar allélopathique ressemble plus à un type sauvage) a été fait et avancé par la méthode SSD de création variétale. Nous avons identifié que la génération F5 de ce croisement exhibe un potentiel allélopathique par la méthode d'extraction à l'eau. Le potentiel allélopathique de la génération F6 est maintenant testé en condition de champ. La méthode SSD est plus simple que la méthode du pedigree. La méthode SSD présente plusieurs avantages incluant l'augmentation rapide de la variance additive parmi les familles; le besoin seulement d'un petit espace de sélection et l'économie de travail; et la convenance pour les faibles traits d'héritabilité là où la sélection visuelle n'est pas efficace (Moreno-Gonzalez et Cubero, 1993).

Une autre méthode est de croiser deux parents ayant des comportements différents par la méthode de back-cross pour produire des lignées quasi isogéniques (NILs) portant différents gènes. Le potentiel allélopathique de la NILs peut être déterminé lorsqu'un degré raisonnable de fixation est obtenu.

Malgré l'influence de la biotechnologie et de l'ingénierie génétique dans les changements futures des méthodes de sélection des nouvelles variétés, la recherche sur la sélection traditionnelle des plantes et les méthodologies de sélection joueront un rôle significatif dans les programmes de sélection futurs. Un perfectionnement plus poussé de ces méthodes et une meilleure connaissance des méthodes classiques sont un préalable pour une utilisation rationnelle des nouveaux outils comme les marqueurs moléculaires.

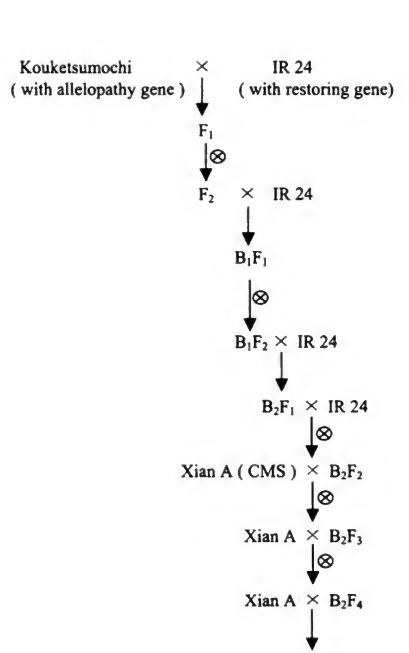


Figure 5. Schéma d'introduction d'un gène allélopathique favorable dans le riz hybride à partir du donneur Kouketsumochi dans le parent récurent IR24, restaurateur de lignée par le backcross simultané et l'auto fécondation.

× : Croisement, ⊗ : Auto fécondation

Riz hybride avec allélopathie

Le triple hybride du riz très cultivé en Chine est un bon compétiteur à cause de sa croissance rapide et de sa profusion végétative en comparaison aux lignées croisées entre elles. Il serait intéressant si les traits allélopathiques peuvent être introduits dans une lignée élite restauratrice dans la création de triples hybrides de riz. Lin *et al* (2000) ont essayé en même temps des méthodes de backcross et d'auto fécondation pour créer des hybrides de riz ayant des activités allélopathiques et son homologue, un riz hybride isogénique sans effet allélopathique sur les mauvaises herbes. Trois lignées de riz, Kouketsumochi, Rexmont et IR24 ont été respectivement utilisées comme donneur d'allélopathie, non-donneur d'allélopathie et restaurateurs de gènes. La méthode du backcross était utilisée pour créer des lignées restauratrices avec des activités allélopathiques et sa lignée isogénique avec des gènes non allélopathiques. Les lignes restauratrices sélectionnées étaient croisées avec des lignées à cytoplasme stérile (lignée A),

actuellement utilisées pour tester le taux d'allogamie (Figure 5) et aussi, pour illustrer comment créer des hybrides de riz ayant du potentiel allélopathique.

Le potentiel allélopathique et la performance héterotique étaient analysés au laboratoire et en serre en utilisant respectivement la méthode d'extraction à l'eau et la méthode densité-dependante (Richardson *et al.* 1998; Lin *et al.* 2000). Les résultats ont montré que l'effet hétérosis sur l'allélopathie du riz était positivement significatif, montrant de plus forts héterosis sur les parents intermédiaires. En plus, cet hybride spécifique du riz a un effet additif de suppression de la mauvaise herbe cible qu'est le Pied-de- Coq (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv), montrant ainsi une large déviation de la courbe de compétition pour les ressources (Lin *et al.* 2000). Cette approche semble être une méthode prometteuse qui peut incorporer les traits allélopathiques à du riz hybride à haut rendement.

Approche moléculaire

Deux méthodes ont été suggérées pour créer plus de cultures allélopathiques: (1) la régulation de l'expression des gènes impliqués dans la biosynthèse des substances allélochimiques; et (2) l'insertion des gènes pour produire les substances allélochimiques qui ne sont pas présentes dans les cultures (Duke *et al.* 2001). La plupart des informations actuellement disponibles sur la manipulation génétique pour la production de substances allélochimiques nous parviennent des efforts de surproduction de métabolites secondaires précieux dans les plantes (Canel, 1999). Concernant l'approche moléculaire de contrôle des mauvaises herbes, une bonne référence a été récemment publiée par Gressel (2002).

La plupart des métabolites secondaires utilisés comme allélochimiques sont très complexes et un système multi-gènes devrait être mis au point et transformé dans la culture spécifique pour produire des substances allélochimiques (Gressel, 2002). Ceci semble être toujours hypothétique, mais il y a de nouvelles ouvertures. Diverses espèces de plantes suppriment d'autres espèces par la production de substances allélochimiques, qui ne sont pas toxiques à la plante qui les produit mais toxiques à d'autres végétations. Il est maintenant connu que les approches moléculaires dans la sélection de cultivars allélopathiques sont potentiellement beaucoup plus complexes que la création d'une culture résistante à un herbicide ou la production d'une culture avec résistance aux insectes et aux pathogènes.

Régulation de l'expression des gènes liés aux allélochimiques

Dans le souci de réguler l'expression des gènes, le premier point est d'identifier les allélochimiques cibles, déterminer les enzymes et les gènes qui codent pour eux, et ainsi un promoteur spécifique peut être inséré dans les cultures pour élever la production de substances allélochimiques.

Dans nos travaux récents, la plus grande composition en acide *p*-coumarique était trouvée dans les intermédiaires du chemin métabolique de phénylpropanoides de plusieurs cultivars allélopathiques de riz utilisés (Figure 4). L'acide cinnamique 4-droxylase (CA4H) est l'enzyme catalysant la transformation de l'acide cinnamique en acide *p*-coumarique lequel est la clé de la réaction dans la biosynthèse d'un grand nombre de composés phénoliques chez les végétaux supérieurs. L'activité du CA4H était mesurée pour élucider comment elle était influencée par les radiations UV dans les feuilles du riz. L'activité du CA4H dans le Kouketsumochi était induite par les UV et son activité maximum était observée 24 heures après l'irradiation aux rayons UV pendant 20 mn. La AUS 196 n'a pas montré de réponse, indiquant cependant une réponse différentielle aux UV ou à d'autres stress environnementaux parmi les cultivars de riz. Ceci indique davantage que quelques métabolites ayant des potentiels allélopathiques pourraient être nouvellement synthétisés ou fortement augmentés dans les plantes de riz par irradiation aux rayons UV (Kim *et al.* 2000a). A cause de la composition élevée de plante de riz en acide *p*-

coumarique après irradiation par les rayons UV, il a été supposé que le gène CA4H y joue un rôle dans l'augmentation de la fonction allélopathique dans les plants de riz.

Une étude plus poussée a été conduite pour chercher le promoteur spécifique qui confère la réponse aux stresses environnementaux et l'interaction plante-plante. Si un promoteur est spécifiquement responsable pour un éliciteur, il peut être utilisé pour réguler les gènes à coder pour le potentiel allélopathique. Nous avons examiné l'expression de l'activité de GUS des plantes de tabac transformé avec les agencements de divers promoteurs de CASC (*Capsicum annum* sesquiterpène cyclase) fusionnés dans le gène GUS afin de déterminer les raisons effectives aux réponses aux UV. Back et al. (1998) ont rapporté que les UV jouent un rôle dans l'expression des gènes liès au mécanisme de et la biosynthèse des phytoalexines dans le piment.

Pour déterminer si les promoteurs CASC sont inductibles par les irradiations UV ou non, nous avons examiné l'activité GUS des plantes transgéniques. Les plantes transgéniques étaient irradiées par les UV pendant 15 mn en utilisant une lampe germicide Hitachi (15 W) à une distance de 20 cm. Les feuilles irradiées étaient placées dans un milieu MS pendant 24 heures et étaient utilisées pour les mesures d'activité. Le niveau d'activité de GUS pour les plantes transgéniques avec pBI121-KF1 et pBI121-KF6 était significativement élevé par irradiation aux UV et avait augmenté de deux à trois fois, approximativement au-dessus des plantes transgéniques non traitées. A l'opposé, l'expression de GUS dans les plantes transgéniques avec le pBI121-CaMV 35S n'était pas changé par les UV, et dans les autres agencements, avait juste une très petite augmentation (Shin *et al.* 2000).

Ce résultat suggère que les promoteurs CASC de KF-1 et KF-6 peuvent contenir des éléments « cis – acting » capables de conférer des modèles d'expression quantitative qui sont exclusivement associés avec les irradiations UV. La régulation des gènes associés avec l'allélopathie peut être réalisé en créant un promoteur spécifique qui répond à la compétition plante-mauvaises herbes ou aux stress environnementaux. Les promoteurs CASC de KF-1 et KF-6 obtenus peuvent être spécifiques aux UV. Ainsi, ce promoteur peut être utilisé pour la sur-expression des promoteurs spécifiques construits pour les gènes produisant les substances allélochimiques (Shin *et al.* 2000). Pour réguler le gène CA4H du chemin métabolique de phenylpropanoide, des promoteurs spécifiques, le CASC-KF1 et le KF6 étaient fusionnés au gène CA4H. L'agencement des gènes était introduit dans le vecteur binaire de l'expression des plantes pIG121-HMR avec l'amorce reverse abritant le site *Bam*HI et plus loin, l'amorce abritant le site *Hin*dIII (Figure 6). A présent, nous sommes en train de chercher les effets régulateurs sur les gènes codant pour la production d'enzymes allélochimiques.

Insertion de gènes pour produire des allélochimiques

Cette approche emploie la modification des chemins métaboliques existant par l'insertion de transgènes pour produire de nouvelles substances allélochimiques. Ceci semble être une approche difficile à employer, mais elle demeure l'une des approches moléculaires les plus prometteuses à être avancé dans un futur proche. A cet égard, il y a eu une bonne revue dirigée par Duke *et al.* (2001) et un livre de référence sur la biologie moléculaire de contrôle des mauvaises herbes publié récemment par Gressel (2002).

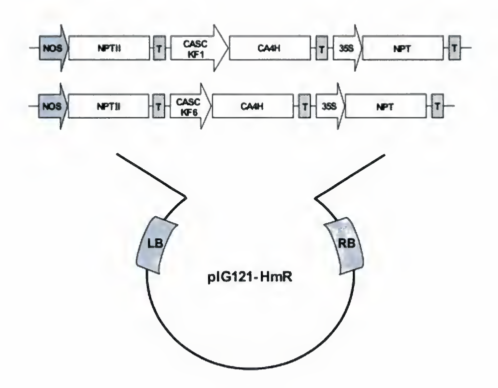


Figure 6. Cassette de gènes avec les promoteurs spécifiques qui répondent aux irradiations UV dans le pIG121-HmR

CONCLUSIONS

Une amélioration du potentiel allélopathique dans les variétés de plantes aura un impact important dans les systèmes de gestion aussi bien à forts qu'à faibles intrants. L'allélopathie seule ne peut remplacer totalement les autres pratiques de contrôle des mauvaises herbes car son efficacité est influencée par plusieurs facteurs. Cependant, une réduction marginale de l'utilisation d'herbicides au cours du temps sera un avantage économiquement significatif pour les cultivateurs et réduira aussi les impacts écologiques sur l'environnement. Pour le moment, il n'existe pas de cultivar commercial portant des propriétés allélopathiques, mais il y a la possibilité de créer de nouvelles cultures allélopathiques en régulant leur capacité à produire des substances allélopathiques. Par rapport au développement de la création de nouveaux cultivars allélopathiques, beaucoup de progrès ont été réalisé dans les méthodes de criblage, l'identification de substances allélochimiques spécifiques et les gènes associés qui peuvent être utilisés dans des programmes de création variétale. Si les allélochimiques ou les gènes responsables des effets allélopathiques sont identifiés, les traits allélopathiques peuvent être facilement incorporés dans les cultivars améliorés à travers des techniques de création variétale disponibles en ce moment. Bien sûr, pour que cette technologie puisse être pratiquement utilisée dans les systèmes de production de riz, des problèmes potentiels tels que l'autotoxicité, le déséquilibre métabolique, l'effet résiduel et le développement de populations tolérantes suite à la répétition des cultures de ces cultivars devraient être complètement réglés avant que les cultivars allélopathiques ne soient introduits en milieu paysan. Néanmoins, il est admis que la création de nouveaux cultivars allélopathiques sera une alternative attrayante qui répond à la demande des consommateurs et des environnementalistes. Une approche pluridisciplinaire avec une large gamme de scientifiques, incluant les spécialistes de mauvaises herbes, des écologistes, les chimistes des produits naturels, les sélectionneurs et des biologistes moléculaires pourrait aider à réaliser l'objectif de la création de cultivars allélopathiques. Des études plus poussées sur l'identification d'allélochimiques spécifiques et des gènes responsables de l'allélopathie apporteront plus de lumière sur la création de cultivars allélopathiques.

BIBLIOGRAPHIE

Back, K., He, S., Kim, K.U. & Shin, D.H. 1998. Cloning and bacterial expression of sesquiterpene cyclase, a key branch point enzyme for the synthesis of sesquiterpenoid phytoalexin capsidiol in UV-challenged leaves of *Capsicum annuum. Plante Cell Physiol.* 39 (9): 899-904.

Ballare, C.L., Barnes, P.W. & Flint, S.D. 1995. Inhibition of hypocotyls elongation by ultraviolet-B radiation in de-etiolating tomato seedlings. I. The photoreceptor. *Physiol. Plante* 93: 584-592.

Banthorpe, D.V. 1991. Terpenoids classification of terpenoids and general procedures for their characterization. In *Terpenoids of Methods in Plante Biochemistry Vol. 7.* Academic Press, London. pp. 1-41.

Berkowitz, A.R. 1988. Competition for resources in weed-crop mixtures. *In* Altiera, M.A.and Liebman, M. eds. *Weed management in agrosystems: ecological approaches.* Boca Raton, Florida, CRC Press. pp. 89-119.

Blum, U. 1998. Effect of microbial utilization of phenolic acid and their phenolic acid breakdown products on allelopathic interactions. *J. Chem. Ecol.* 24: 685-708.

Bonner, J. 1950. The role of toxic substances in the interactions of higher plantes. *The BotanicalReview* 16: 51-65.

Canel, C. 1999. From genes to phytochemicals: the genomics approach to the characterization and utilization of plante secondary metabolism. *Acta Hortic.* 500: 51-57.

Christensen, S. 1993. *Weed suppression in cereal varieties.* Min. Agric.Statens Planeavlsforsog. Denmark. No. 1. p. 104. (Ph.D. thesis)

Chou, C.H., Chang, F.J. & Oka, H.I. 1991. Allelopathic potential of wild rice *Oryza perennis. Taiwania* 36 (3) 201-210.

Courtois, B. & Olofsdotter, M. 1998. Incorporating the allelopathy trait in upland rice breeding programs. *In* Olofsdotter, M. ed. *Allelopathy in Rice.* Manila, Philippines: Int. Rice Research Institute. pp. 57-68.

Dilday, R.H., Nastasi, P., Lin, J. & Smith, R.J., Jr. 1991. Allelopathic activity in rice (*Oryza sativa* L.) against ducksalad (*Heteranthera limosa* (sw.) Willd.). *In* D. Hanson, M.J. Shaffer. D.A. Ball. and C.V. Cole., eds. *Symposium Proc. on Sustainable Agriculture for the Great Plains.* USDA, ARS-89. pp. 193-201.

Dilday, R. H., Yan, W.G., Moldenhauer, K.A.K. & Gravois, K.A. 1998. *Allelopathic activity in rice for controlling major aquatic weeds. In* Olofsdotter, M., ed. Allelopathy in Rice. Manila, Philippines: Int. Rice Research Institute. pp. 7-26.

Duke, S.O., Scheffler, B.E., Dayan, F.E., Weston, L.A. & Ota, E. 2001. Strategies for using transgenes to produce allelopathic crops. *Weed Tech.*15: 826-834.

Ebana, K., Yan, W., Dilday, R.H., Namai, H. & Okuno, K. 2001. Variation in the allelopathic effect of rice with water soluble extracts. *Agronomy J.* 93: 12-16.

Einhehelig, F.A., Leather, G.R. & Hobbs, L. 1985. Use of *Lemma minor* L. as a bioassay in allelopathy. *J.Chemical Ecology* 11(1): 65-72.

Fay, P.K. & Duke, W.B. 1977. An assessment of allelopathic potential in *Avena* germplasm. *Weed Sci.* 25: 224-228.

Fujii, Y. 1992. The potential biological control of paddy weeds with allelopathy: allelopathic effect of some rice varieties. In *Proc. Int. Symposium on Biological Control and Integrated Management of Paddy and Aquatic Weeds in Asia.*Tsukuba, Japan. National Agricultural Research Center. pp. 305-320.

Garrity, D.P., Movillon, M. & Moody, K. 1992. Differential weed suppression ability in upland rice cultivars. *Agon. J.* 84: 586-591.

Gaudet, C.L. & Keddy, P.A. 1988. A comparative approach to predicting competitive ability from plante traits. *Nature* 334: 242-243.

Gershenzon, J. & Croteau, R. 1993. *Terpenoid biosynthesis: the basic pathway and formation of monoterpenes, sesquiterpenes, and diterpenes. In* T.S. Moore., ed. Lipid Metabolism in Plantes. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. pp. 340-388.

Gressel, J. 2002. Molecular Biology of Weed Control. Taylor and Francis Publishers, London.Hahlbrock, K. and D. Scheel 1989. Physiology and molecular biology of phenylpropanoid metabolism. Ann. Rev. Plantc Physiol. *Plante Mol. Biol.* 40: 347-369.

Hill, J.E., Roberts, S.R., Scardaci, S.C. & Williams, J.F. 1997. Rice herbicides and water quality. A Califonia success story in government and industrial coordination.*Proc. of 16th Asian Pacific Weed Society Conference* (Kuala Lumpur, Malaysia).Asian-Pacific Weed Science Society, Kuala Lumpur, pp. 388-392.

Inderjit. 1996. Plante phenolics in allelopathy. *Bot. Rev.* 62: 186-202.

Itoh K. 2000. Importance of biodiversity of aquatic plantes in agro-ecosystem for rice production. In *Abstracts of the Int. Symposium on Weed Biodiversity* (National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan, 28-30 November, 2000). Weed Science Society of the Republic of China and National Sun Yat-sen University, Kaoshing, p. 10.

Jensen, L.B., Courtois, B., Shen, L., Li, Z., Olofsdotter, M. & Mauleon, R.P. 2001 Location genes controlling rice allelopathic effects against barnyardgrass in upland rice. *Agron. J.* 93: 21-26.

Khush, G.S. 1966. Genetic improvement of rice for weed management. *In* Naylor, R., ed. *Herbicides in Asian rice: transitions in weed management.* Palo Alto (California):Institute for Int. Studies, Stanford University, and Manila (Philippines): Int. Rice Research Institute. pp. 201-207.

Kim, K.U. & Shin, D.H. 1998. Rice allelopathy research in Korea. *In* M. Olofsdotter, ed. *Proc. of the Workshop on Allelopathy in Rice,* 25-27 November 1996. Manila (Philippines): Int. Rice Research Institute. pp. 39-44.

Kim, K.U., Shin, D.H., Kim, H.Y., Lee, I.J. & Olofsdotter, M. 1999. Evaluation of allelopathic potential in rice germplasm. *Korean J. of Weed Sci.*9 (2): 1-9.

Kim, K. U. 2000. Weed management implication and trends of direct seeding in Asia. Third Int. Weed Science Congress (Foz do Iguassu, Brazil, 6-11 June 2000). *Int. Weed Science Society, Corvallis, Manuscript no. 508*, pp. 1-10.

Kim, H.Y., Shin, H.Y., Sohn, D.S., Lee, I.J., Kim, K.U., Lee, S.C., Jeong, H.J. & Cho, M.S. 2000a. Enzyme activities and compounds related to self-defense in UV-challenged leaves of rice. *Korean J. Crop Sci.* 46 (1): 22-28.

Kim, K.W., Kim, K.U., Shin, D.H., Lee, I.J., Kim, H.Y., Koh, J.C. & Nam, S.H. 2000b. Searching for allelochemicals from the allelopathic rice cultivar, Kouketsumochi. Korean *J. of Weed Sci.* 20 (3): 197-207.

Leather, G.R. 1983. Sunflowers (*Helianthus annuus*) are allelopathic to weeds. *Weed Sci.* 31: 37-42.

Lin, W., Kim, K.U. , Liang, K. & Guo, Y. 2000. Hybrid rice with allelopathy, *In* K.U. Kim and Shin, D.H. eds. Rice Allelopathy. *Proc. of the Int. Workshop in Rice Allelopathy* (Kyungpook National University, Taegu, Korea, 17-19 August 2000). Institute of Agricultural Science and Technology, Kyungpook National University, Taegu, pp. 49-56.

Liu, D.L. & Lovett, J.V. 1993. Biologically active secondary metabolites of barley. 1. Developing techniques and accessing allelopathy in barley. *J.of Chemical Ecology* 19 (10): 2217-2230.

Liu, L., Gitz, D.C. & McClure, M.W. 1995. Effect of UV-B on flavonoids, ferulic acid, growth and photosynthesis in barley primary leaves. *Physiol. Plante* 93: 725-733.

Lovett, J.V. & Hoult, A.H.C. 1995. Allelopathy and self-defense in barley. *Am. Chem. Soc. Symp. Ser.* 582: 170-183.

Mattice, J.D., Lavy, T., Skulman, B.W. & Dilday, R.H. 1998. Searching for allelochemicals in rice that control ducksalad. *In* M. Olofsdotter., ed. Allelopathy in rice. *Proc. Workshop on Allelopathy in Rice.* Manila, Philippines, 25-27 Nov. 1996. IRRI, Manila, Philippines. pp. 81-98.

Mattice, J.D., Dilday, R.H., Gbur, E.E. & Skulman, B.W. 2001. Barnyardgrass growth inhibition with rice using high-performance liquid Chromathography to identify rice accession activity. *Agron. J.* 93: 8-11.

Minotti, P.L. & Sweet, R.D. 1981. Role of crop competition in limiting losses from weeds. *In* D. Pimental ed. *Handbook of pest management in agriculture. Vol. II.* Boca Raton Florida, USA. CRC Press. pp. 351-367.

Moody, K. 1991. *Weed management in rice*. *In* Handbook of Pest Management in Agriculture 2nd edition. Pimenteal, D. ed. CRC Press Boca Raton, Florida, USA. pp. 301-328.

Moreno-Conzales, J. & Cubero, J.I. 1993. Selection strategies and choice of breeding methods. *In* Hayward, M.D., ed. *Plante Breeding*. Chapman and Hall, pp. 296-297.

Navarez, D. & Olofsdotter, M. 1996. Relay seeding procedure as screening method in allelopathy research. *Proc. 2nd Int. Weed Control Conf.* 4: 285-1290.

Nimbal, C.I., Yerkes, C.N., Weston, L.A. & Weller, S.C. 1996. Herbicidal activity and site of action of the natural product sorgoleone. *Pestic. Biochem. Physiol.* 54: 73-83.

Olofsdotter, M., Navarez, D., Rebulanan, M. & Streibig, J.C. 1999. Weed suppressing rice cultivars – does allelopathy play a role ? *Weed Res.* 39: 441-454

Olofsdotter, M. 2001a. Getting closer to breeding for competitive ability and the role of allelopathy-an example from rice (*Oryza sativa*). *Weed Tech.* 15: 798-806.

Olofsdotter, M. 2001b. Rice - A step toward use of allelopathy. *Agron.* J. 93: 3-8.

Olofsdotter, M., Rebulanan, M., Madrid, A., Dali, W., Navarez, D. & Olk, D.C. 2001. Why phenolic acids are unlikely allelochemicals in rice. *J. Chem. Ecol.* (in press).

Pandy, S. & Pingali, P.I. 1996. Economic aspects of weed management. *In* Auld, B.A. & Kim, K.U. eds. *Weed Management in Rice*. FAO, Plante Production and Protection Paper 139. Food and Agriculture Organization of the United States, Rome. pp.55-73.

Patrick, A.Q., Toussoun, T.A. & Snyder, A. 1963. Phytotoxic substances in arable soils associated with decomposition of plante residues. *Phytopathology* 53: 152-161.

Putnam, A.R. & Duke, W.B. 1974. Biological suppression of weeds: Evidence for allelopathy in accessions of cucumber. *Science* 185: 370-372.

Richardson, D.R. & William, G.B. 1988. Allelopathic effects of sRHubs of the sand pine scrub on pines and grasses of the sandhills. *Forest Science* 34: 592-605.

Rice, E.L. 1987. Allelopathy: An overview. Allelochemical: Role in agriculture in forestry. In *American Chemical Society Symposium Series* No. 330. pp. 8-22.

Rimando A.M., Dayan, F.E., Czarnota, M.A. Weston, L.A. & Duke, S.O. 1998. A new photosystem. II. Electron transfer inhibitor from *Sorghum bicolor*. *J. Nat. Prod.* 61: 927-930.

Rimando, A.M., Olofsdotter, M., Dayan, F.E. & Duke, S.O. 2001. Searching for rice allelochemicals: an example of bioassay-guided isolation. *Agron. J.* 93: 16-20.

Shin, D.H.,. Kim, K.U., Sohn, D.S., Kang, S.U., Kim, H.Y., Lee, I.J. & Kim, M.Y. 2000. Regulation of gene expression related to allelopathy. *In* Kim, K.U. & Shin, D.H., eds. *Proc. of the Int. Workshop in Rice Allelopathy* (Kyungpook National University, Taegu, Korea, 17-19 August 2000). Institute of Agricultural Science and Technology, Kyungpook National University, Taegu, pp. 109-124.

Tanaka, F., Ono, S. & Hayasaka, T. 1990. Identification and evaluation of toxicity of rice root elongation inhibitors in flooded soil with added wheat straw. *Soil Sci. Plante Nutr.* 36: 97-103.

Tevini, M., Braun, J. & Fieser, G. 1991. The protective function of epidermal layer of rye seedlings against ultraviolet-B radiation. *Photochem. and Photobiol.* 53: 329-333.

Valverde, B.E., Riches, C.R. & Caseley, J.C. 2000. *Prevention and management of herbicide resistant weeds in rice*. Published by Grafos, S.A., Cartago, Costa Rica. pp. 25-30.

Wu, H., Pratley, H., Lemerle, D. & Haig, T. 1999. Crop cultivars with allelopathic capability. *Weed Res.* 39: 171-180.

Solarisation du sol

Barakat Abu Irmaileh

INTRODUCTION

En préalable à la facile disponibilité de pesticides dans les années 1940, la désinfection du sol conduite avec l'utilisation de la chaleur, la vapeur d'eau ou l'eau chaude était une vielle méthode bien connue utilisée pour contrôler les organismes nuisibles du sol (Newhall, 1955; Baker, 1962). L'élévation de la température du sol à 60° par la vapeur d'eau aérée pendant 30 mn était l'une des méthodes standard recommandées dans le contrôle des organismes nuisibles du sol (Brazelton, 1968).

La solarisation du sol est un terme qui se réfère à la désinfection du sol par la chaleur générée par le piégeage de l'énergie solaire. Le piégeage de l'énergie solaire pour élever la température du sol et y contrôler les organismes nuisibles est une vieille entreprise hasardeuse. Grooshevoy (1939) a mené des expériences sur la solarisation du sol dans le Caucase en 1938. Il a obtenu un contrôle effectif des organismes pathogènes du sol en piégeant l'énergie solaire sous des structures froides exposées à la lumière directe du soleil pendant des périodes suffisamment longues pour élever la température du sol entre 40° et 60° dans les couches superficielles (à une profondeur de 10 cm) avant la plantation, avec pour résultat le contrôle des racines noires et pourries des plantules de tabac causées par *Thielaviopsis basicola.*

La solarisation du sol est une procédure hydrothermale qui se fait en sol humide couvert par un film plastique et exposé au soleil pendant les mois chauds. Le processus du chauffage du sol est connu sous le terme de solarisation et renferme les changements complexes physiques, chimiques, et biologiques du sol associés au réchauffement du sol et est une alternative à l'utilisation de certains produits chimiques agricoles qui devront être progressivement éliminés des usages agricoles. La solarisation du sol est une procédure de paillage qui tire ses origines des débuts de l'agriculture où la pratique est utilisée pour couvrir le sol et les plantes avec de la matière organique ou inorganique afin de former une barrière contre le gel. Le sol réchauffé était utilisé pour accélérer la croissance des plantes et le paillage était aussi utilisé pour limiter l'évaporation de l'eau du sol, contrôler les mauvaises herbes, améliorer la couche arable du sol et lutter contre l'érosion (Lai, 1974); Waggoner et al. (1960); Burrows et Larson, (1962).

Lorsque les paillis plastiques on fait leur première apparition dans l'utilisation, le polyéthylène était le film idéal pour le réchauffement solaire du sol car il est essentiellement transparent aux radiations solaires (280-2500 nm), prolongeant aux longues infrarouges, mais peu transparent aux radiations terrestres (5 000-35 000 nm), réduisant ainsi la fuite de la chaleur du sol. Le polyéthylène est un produit pétrochimique et son coût est directement lié à son épaisseur. Les films polyéthylène ont été utilisés effectivement dans la solarisation du sol.

CONVERSION DE LA RADIATION SOLAIRE EN CHALEUR SOUS PAILLIS

Pendant la solarisation du sol, les radiations solaires qui arrivent pénètrent le film plastique et sont absorbés par le sol. La plupart des radiations absorbées sont converties en chaleur. Puisque tous les objets au-dessus du zéro absolu émettent des radiations, la quantité et la qualité de l'énergie irradiante émise du sol dépendent de la température du sol. Selon la loi de Stefan, la quantité de radiation émise est une fonction de quatrième puissance de la température absolue.

$Q = e\delta T^4$

Q = quantité d'énergie émise en calories
δ= constante de Stefan-Boltzman (8.132×10^{-11} cal/cm^2/min.degK^4)
T = température absolue en degrés Kelvin

La longueur d'onde de la radiation émise par objet est aussi influencée par la température. Selon la loi de Wein, la longueur d'onde de la radiation émise est inversement proportionnelle à la température de l'objet ($\lambda \alpha 1/T$). Ainsi, la radiation solaire est émise dans les ondes plus courtes comparativement à celle émise à partir de la terre (*99 % des radiations solaires se trouvent entre 150-4 000 nm, alors que la radiation terrestre se trouve à environ 10 000 nm, 99 % des radiations de la terre sont émises entre 400-100 000nm (long IR*) (Salisbury et Ross, 1980). De ce fait, les radiations terrestres peuvent facilement pénétrer les paillis plastiques, mais les radiations émises à partir du sol (normalement au niveau des ondes longues) ne peuvent pas traverser la couverture plastique. En conséquence la plupart des radiations sont piégées sous le paillis plastique. Au cours du processus, la température du sol peut augmenter à des niveaux létaux pour les organismes du sol, y compris les plantes pathogènes et les organismes nuisibles.

ACTION SELECTIVE CONTRE LES ORGANISMES DU SOL

L'efficacité de la solarisation du sol dans le contrôle des ravageurs du sol est une fonction de la relation entre le temps et la température, et est basée sur le fait que la plupart des pathogènes des plantes, les mauvaises herbes et autres déprédateurs sont mésophiles. Pour les organismes mésophiles, le seuil de température d'environ 37°C est critique. L'accumulation des effets de chaleur à cette température ou à des températures plus élevées sur une longue durée est létale. Avec des températures croissantes, il est requis moins de temps pour atteindre une combinaison létale du temps et de la température. Par exemple, à 37°C, une température létale (LD_{90} pour plusieurs champignons mésophiles), l'exposition peut demander 2 – 4 semaines, alors qu'à 47°C, une exposition de 1-6 heures résulterait en une LD_{90} (DeVay, 1990).

Les températures communément atteintes par la solarisation du sol varient entre 35-60°C et dépendant de la profondeur du sol, et atteignant des températures plus fortes que 45°C dans les 15 premières centimètres dans la vallée de San Joaquin pendant l'été (Stapleton, 1990). Plusieurs organismes nuisibles sont contrôlés de façon adéquate pendant une solarisation de 4 à 8 semaines dans les 10 -30 cm (zone racinaire).

Les températures atteintes pendant la solarisation du sol sont considérées comme anodines comparées au chauffage du sol à la vapeur (Baker, 1962; Stapleton et DeVay, 1986). Ainsi, la solarisation du sol est plus sélective vis à vis des biotes thermophiles et thermotolérants, les actinomycètes qui peuvent survivre et éventuellement se développer sous la solarisation (Gamliel *et al.* 1989; Stapleton, 1981). Les effets létaux de la solarisation du sol sont plus prononcés sur les micro-organismes qui ne sont pas de bons compétiteurs. Plusieurs pathogènes appartiennent à ce groupe puisqu'ils tendent à avoir des besoins physiologiques spécialisés qui sont plus adaptés à la coexistence avec les plantes hôtes (Stapleton et DeVay, 1986), impliquant des changements de populations, qui favorisent les espèces thermotolérantes, incluant les espèces de *Bacillus*, les pseudomonades fluorescents et les champignons thermotolérants (Gamliel *et al.* 1989 ; Stapleton, 1989) ce qui peut supprimer des pathogènes et permettre la recolonisation (après de possibles déclins initiaux dans leurs populations) par les micro-organismes plus compétitifs et souvent antagonistes des pathogènes des plantes et des ravageurs. Le champignon antagoniste *Trichoderma harzianum* colonise aggressivement les sols solarisés (Katan, 1981). La plupart des micro-organismes tolérants à la solarisation ont été impliqués comme des agents de contrôle biologique ou de stimulation de la croissance des plantes (Baker et Cook, 1974).

MODE D'ACTION PROPOSE

Bien que la solarisation du sol se présente comme une méthode très simple, le mode d'action est complexe, et peut être décrit par des effets physiques, chimiques et biologiques.

Les organismes liés au sol sont directement ou indirectement tués par les températures atteintes durant le chauffage des sols humides par le soleil sous les films de polyéthylène qui restreignent sérieusement la fuite des gaz et de la vapeur d'eau du sol. La sensibilité des micro-organismes aux températures élevées est liée à de petites différences dans les macromolécules qui conduisent à l'augmentation des liaisons intra-moléculaires avec des changements légers dans les liaisons H, ioniques et disulfites (Brock, 1978). Les lipides insaturés (ayant un plus faible point de fusion) dans les membranes des organismes mésophiles les rend plus sensibles que les thermo-tolérants aux fortes températures pendant la solarisation du sol. La sensibilité des organismes à la chaleur est liée à une limite supérieure de fluidité des membranes au delà de laquelle la fonction de la membrane est réduite (Sundarum, 1986). La courbe de mort thermique des champignons a une allure logarithmique dans la nature (Pullman *et al.* 1981). Les organismes thermotolérants et thermophiles liés au sol survivent habituellement au processus de solarisation du sol (Brock, 1978, Stapleton et DeVay, 1984).

Le déclin thermique des organismes liés au sol pendant la solarisation dépend de l'humidité du sol, de la température et de la durée d'exposition qui sont inversement liés. L'humidité du sol est une variable critique dans la solarisation. Elle rend les organismes non seulement plus sensibles à la chaleur, mais aussi, augmente fortement le transfert de la chaleur aux semences des mauvaises herbes et à d'autres organismes vivant dans le sol. Comme la solarisation du sol est un processus hydrothermique et que son succès dépend de l'humidité pour un transfert maximum de chaleur, les chaleurs maxima des sols augmentent avec l'augmentation de l'humidité du sol (Mahrer, 1979). Les activités cellulaires des semences et la croissance des micro-organismes liés au sol sont favorisées par l'humidité du sol qui les rend plus vulnérables aux effets létaux des températures élevées associés à la solarisation du sol.

L'inter-action entre températures et humidité du sol conduit au cycle de l'eau dans le sol pendant la solarisation. Les couches les plus superficielles (au-dessus de 5 cm) présentent une fluctuation diurne remarquable de la température, fraîche dans la nuit, chauffant à une température élevée durant les heures d'ensoleillement. Cette fluctuation diurne fait que l'humidité dans les zones superficielles du sol se déplace vers le bas pendant la journée comme résultat des radiations solaires. Pendant la nuit, la surface du sol se refroidit entraînant une migration de l'humidité vers le haut. Au fur et à mesure que la solarisation va en profondeur dans le sol, le mouvement de l'humidité devient plus prononcé, modifiant la distribution des sels et améliorant la structure du sol. Une réduction de la salinité du sol résultant de sa solarisation a été rapportée par Abdel-Rahim *et al.* (1988). Pour maximiser cet effet dans le sol, une pré-irrigation au début de la solarisation devrait atteindre au moins 60 -75 cm de profondeur. En plus, l'efficacité de la solarisation est aussi influencée par le type de sol, la couleur et la structure du sol, l'humidité du sol, l'épaisseur et la transmittance, du matériel de paillage(film plastique), la teneur en matière organique, la température de l'air , la longueur du jour, l'intensité de la lumière solaire l'importance de la chaleur, la sensibilité des espèces de pathogènes et des organismes nuisibles à la chaleur, l'histoire culturale, et autres composantes de l'écologie du sol (Katan, 1987; Stapleton et DeVay, 1986).

La chaleur générée dans le sol par la radiation solaire et la mort des organismes nuisibles qui en résulte répond aux principes de la solarisation du sol. Cependant, l'accroissement dans la disponibilité des éléments nutritifs des plantes et l'augmentation relative des populations de bactéries de la rhizosphère, comme *Bacillus* spp. (Stapleton et DeVay, 1984), qui contribuent à l'élévation remarquable de la croissance, le développement et le rendement des plantes cultivées

sur sol solarisé, sont les composantes majeures de la solarisation des sols (Katan, 1985; Stapleton et Devay, 1986).

Les disponibilités accrues des éléments minéraux après la solarisation du sol sont particulièrement celles immobilisées dans les fractions organiques comme NH_4-N, NO_3-N, P, Ca et Mg comme résultat de la mort du microbiote (Baker 1962; Chen et Katan 1980; Stapleton *et al.* 1990 ; Stapleton *et al.* 1985). Les P, K, et Ca solubles ont été quelquefois trouvés en grande quantité après la solarisation du sol (Stapleton *et al.* 1985). La libération des composés de N (vapeur et liquide) est une composante du mode d'action, une concentration accrue de N sous forme réduite conduirait à une nitrification après la fin de la solarisation du sol pour fournir du NO_3 pour une croissance accrue des cultures (Stapleton *et al.* 1990).

La concentration relative de chaque élément est une fonction du pH du sol et des micro-organismes de nitrification (Hasson *et al.* 1977). Une température élevée pendant la solarisation dans un sol contenant un fort taux de matière organique peut tuer beaucoup de microbiote, y compris les microorganismes de nitrification et favorisant ainsi l'accumulation de NH_4-N. D'autre part, une température basse dans le sol avec un faible taux de matière organique permettrait la survie des biotes du sol et favoriserait les conditions aérobiques, avec une libération minimale de composés azotés, ayant comme résultat la nitrification et la perte de l'N du sol puisque le NO_3 est facilement lessivé.

SOLARISATION ET BIOFUMIGATION

La solarisation du sol provoque aussi des changements dans les composés volatiles du sol (Stapleton et DeVay, 1986). Différents types de matière organique, comme le fumier et les résidus de récolte pourraient être combinés avec la solarisation du sol pour réaliser une biofumigation, de sorte à élever la température du sol résultant de la chaleur issue de la décomposition de ces matérielles dans le sol, et pour accroître la capacité de conductivité de la chaleur par le sol (Gamliel et Stapleton, 1993). Au cours du processus de solarisation, les composés biotoxiques volatiles sont libérés quand la matière organique est chauffée (Stapleton, 1997). Les amendements organiques, particulièrement les résidus de plantes et le fumier animal augmentent l'activité biocide de la biofumigation à travers la production de composés biotoxiques volatiles émanant de la décomposition de matières organiques (Gamliel et Stapleton, 1993; Gamliel et Stapleton, 1997). Plusieurs composés biotoxiques volatiles ont été produits au cours de la décomposition de résidus de choux, spécifiquement durant les trois premières semaines de la solarisation du sol (Gamliel et Stapleton, 1993a).

Le traitement du sol par des engrais organiques et inorganiques à base de NH_4 et/ou la solarisation était actif contre les populations naturelles de *Pythium ultimum* et *Meloidogyne incognita* dans le sol. La combinaison des fertilisants avec la solarisation du sol réduit la population de *Verticillium dahliae* dans certains cas. Le compost de fientes de volaille seul à 5381 kg/ha a significativement réduit la population de *Pythium* sp., et quand il est combiné avec la chaleur (42°C), la population de *Pythium* était éradiquée (Stapleton *et* al. 1990).

TECNHIQUE DE SOLARISATION DU SOL, OPPORTUNITES ET LIMITES

La solarisation du sol est normalement conduite pendant la période la plus chaude de l'année, ce qui signifie en été dans l'hémisphère Nord. Il inclut la bonne préparation du sol pour les cultures, c'est à dire les sols doivent être irrigués, et ensuite labouré toutes les fois que la structure du sol le permet. Les grosses mottes doivent être cassées, les pierres, les mauvaises herbes, les débris ou tout autre objet qui peut soulever ou trouer le paillis devraient être enlevés. La surface du sol doit être aplanie et bien nivelée avant le paillage. Les feuilles plastiques des spécifications souhaitées sont par la suite étalées (à la machine ou à la main), avec les angles encrés fermement par ensevelissement dans des tranchées entourant l'aire traitée. Le plastique est déplié soit pour

une couverture complète, soit pour une couverture en bandes là où, seules les lignes de plantation sont à traiter. Si des machines lourdes sont utilisées, pour étaler le plastique, le sol doit être suffisamment sec pour éviter le tassement. Des irrigations complémentaires sont nécessaires tous les 2-3 semaines pour conserver l'humidité pendant la période de la solarisation du sol (une période de 6 semaines est recommandée en plusieurs endroits, y compris la Jordanie). Une post-irrigation après le paillis plastique peut être effectuée par des lignes de conduite d'eau goutte à goutte ou par des sillons creusés avant l'étalement du film plastique. Les agriculteurs de la Vallée Centrale de la Jordanie irriguent habituellement deux fois par semaine, mais seulement avec de faibles quantités. Au total, environ 103 m^3 sont appliqués en moyenne par plastique de 500 m^2 (2000m^3 par ha) pour toute la période qui dure à peu près 40 jours. Ceci est presque la même quantité nécessaire pour l'application du bromure de méthyle, où les agriculteurs utilisent environ 100 m^3 en moyenne (Barakat *et al.* 2001). Les films plastiques peuvent être enlevés avant la plantation, ou peuvent être laissés au sol comme paillis pour les cultures suivantes, en plantant/ transplantant dans les ouvertures perforées dans le plastique. Dans ce cas, la solarisation avec du plastique noir est pratiquée.

La solarisation du sol est une méthode qui n'utilise pas de pesticides, n'est pas dangereuse pour l'utilisateur, et ne transmet pas de résidus toxiques au consommateur. Il est facile de former les agriculteurs à son utilisation. Le produit sera exempt de pesticide (si d'autres pesticides ne sont pas utilisés), et peut conduire à de bons prix sur le marché. Il peut être intégré à la lutte intégrée (IPM) et permettre le contrôle de plusieurs organismes nuisibles du sol. La solarisation du sol peut être manuelle ou motorisée et de ce fait, convient aussi bien aux pays développés qu'aux pays en développement.

La rentabilité de la solarisation du sol devrait prendre en compte les effets du traitement à court et à long terme sur les agro-écosystèmes (gestion des organismes nuisibles liées au sol, augmentation du rendement, amélioration des niveaux des éléments nutritifs dans le sol et d'autres caractéristiques), de même que les opportunités que la solarisation du sol peut offrir pour un contrôle économique des organismes nuisibles. Certaines de ces opportunités ont été soulignées par Elmore (1990) et sont les suivantes :

- dans une culture où il n'y a pas de pesticides disponibles à cause du manque d'homologation, de disponibilité, de tolérance des cultures, des risques liés à l'application de pesticide ou les frais occasionnés;
- dans une culture où il existe des problèmes d'organismes nuisibles qui ne permettent pas le contrôle par d'autres moyens;
- dans les cas où plus d'un problème d'organismes nuisibles peuvent être résolus avec la solarisation du sol;
- là où les cultures sont organiques;
- là où la solarisation du sol peut changer la séquence culturale, ou cultiver pour augmenter le rendement sur la même parcelle, ou pour maintenir les rendements sur les plus petites parcelles;
- dans une culture où la vigueur précoce des plantules et une croissance rapide présentent un avantage;
- au niveau de la compétitivité sur le marché des produits organiques avec les produits traités par les pesticides conventionnels;
- Un meilleur impact sur l'environnement.

Cependant, la solarisation du sol présente ses limites et ses difficultés. Elle peut être seulement utilisée à certains moments et dans des climats chauds et le sol doit être libre de toute culture pour la période de solarisation. Elle peut être moins efficace et chère dans les régions plus fraîches. Son application est limitée à certains systèmes, c'est à dire, les légumes irrigués et les vergers. Elle n'est pas applicable pour le contrôle des organismes nuisibles dans les productions

agricoles à grande surface qui sont tributaires de la pluie dans les environnements arides ou semi-arides.

D'autres limites incluent :

- le besoin d'un champ libre de culture pour une période relativement longue (1-2 mois) pendant les mois d'été;
- le manque d'eau pour les irrigations supplémentaires pendant la solarisation du sol;
- la survie des pathogènes dans les couches profondes du sol.
- la possible pollution par les résidus plastiques après la fin du traitement;
- le manque de machine adéquate pour un paillage plastique du sol à grande échelle dans les pays en développement
- quelques organismes nuisibles ne sont pas contrôlés ou sont difficiles à contrôler par ce traitement;
- il n'y a pas de contrôle des organismes nuisibles dans les sillons entre bandes solarisées;
- Vent fort et animaux peuvent déchirer le plastique.

SOLARISATION ET GESTION DES ORGANISMES NUISIBLES

Différentes études ont été conduites sur l'efficacité des piégeages de l'énergie solaire par les paillages plastiques des sols humides pendant les périodes des plus fortes températures de l'air et de forts ensoleillements pour augmenter suffisamment la température du sol pour tuer les organismes nuisibles du sol (Katan *et al.* 1976; Braun, 1987; Abu-Irmaileh, 1991; Chen et Katan, 1980). La solarisation du sol a démontré son efficacité, est sans danger pour l'environnement, et est applicable dans diverses situations agronomiques pour le contrôle de différents organismes nuisibles liés au sol, incluant les phytopathogènes et les mauvaises herbes. Deux conférences internationales ont été tenues sur la solarisation du sol; et les actes ont couvert divers aspects de la solarisation du sol, les applications et les limites (De Vay, Stapleton et Elmore (eds), 1991; Stapleton, De Vay et Elmore (Eds), 1997).

Le *Verticillium* et le *Fusarium* responsables du flétrissement de plusieurs cultures, de même que d'autres maladies, ont été contrôlées avec succès par la solarisation du sol. Cependant, ce succès a été limité pour le contrôle de certaines maladies causées par d'autres champignons incluant quelques espèces de *Pythium*, *Fusarium*, *Sclerotium roflsii*, et quelques pathogènes tolérants à la chaleur (Stapleton et De Vay, 1986). Une solarisation post-plantation a permis de contrôler le flétrissement dû au champignon *Verticillium* de Pistacio (Ashworth et Gaona, 1982).

Les populations des nématodes du sol étaient réduites par la solarisation du sol à des degrés divers (Stapleton et De Vay, 1986; Abu Gharbieh *et al.* 1990). Les populations de *Pratylenchus thornei* étaient largement supprimées par la solarisation du sol. (Greco *et al.* 1990). Le contrôle de *Meloydogyne* spp. par la solarisation du sol s'est amélioré quand le sol était traité avec les nématicides systémiques dans les sols sablonneux (Osman, 1990).

Comparé au polyéthylène transparent, le polyéthylène noir contenant du carbone noir, absorbe les radiations solaires et de ce fait réduit le chauffage du sol de plusieurs degrés. La moyenne maximale des températures pendant toute la période de solarisation du sol à une profondeur de 10 cm était respectivement de 46.2°C et 45.7°C sous un CPE et un BPE d'une épaisseur de 0,06 mm, et de 41.8°C dans les sols non couverts (Barakat, 1987). Les films plus minces sont plus efficaces dans l'échauffement du sol et sont plus rentables (Stapleton et De Vay 1986). Dans les sols couverts par du plastique polyéthylène clair (CPE), la plus forte température à une profondeur de 10 cm était de 52.4°C sous un CPE de 0.04 mm d'épaisseur, et de 47,9°C sous un CPE de 0.08 mm d'épaisseur du 12 août au 16 octobre 1986 dans la Vallée du Jourdain (Abu-Irmaileh, 1991a, 1991b). Cependant, les polyéthylènes noirs sont plus stables et durent plus

longtemps dans les conditions de champ (Anonyme, 1984; Dubois, 1978; Hancock, 1988; De Vay, 1990). La couverture du sol par les films en polyéthylène noir a réduit la population de plusieurs champignons pathogènes du sol, comme la rouille du sud (de l'anglais "southern blight") de la tomate et du haricot nain causées par *Sclérotium rolfsii* (Reynolds, 1970); la verse de la laitue causée par *Sclerotinia minor* (Hawthorn, 1975) et les pourritures de la laitue causées par *Rhizoctonia solani* et les bactéries (Hillborn *et al.* 1957). Le complexe des changements qui apparaissent dans les sols solarisés peuvent persister pendant au moins 2 ans (Pullman *et al.* 1981).

L'un des résultats visibles de la solarisation du sol est le contrôle d'un large spectre de mauvaises herbes. De ce fait, la solarisation du sol est suggérée comme une méthode de contrôle des mauvaises herbes. Cependant, la réponse des mauvaises herbes à la solarisation du sol est variable. La solarisation du sol réduit effectivement tôt au cours de la saison le taux de dispersion des mauvaises herbes, mais cet effet décroît graduellement vers la fin de la saison. La solarisation du sol contrôle efficacement les mauvaises herbes annuelles et la mauvaise herbe parasite qu'est l'*Orobanche*. Cependant, les mauvaises herbes pérennes sont plus tolérantes à la solarisation du sol. Plusieurs mauvaises herbes tolérantes ne sont pas contrôlées par la solarisation avec le CPE sans d'autres couvertures du sol. La solarisation avec le CPE ou le BPE suivi par un paillage avec le BPE a été le meilleur traitement pour le contrôle des mauvaises herbes. La solarisation du sol par le paillage avec le BPE est recommandée pour un contrôle presque complet des mauvaises herbes le reste de la campagne agricole. Dans ce cas, le même paillis n'est pas déplacé, mais perforé à des écartements requis. La plantation des plantules peut être faite dans les perforations du paillis. La perturbation du sol après solarisation réduit le niveau de contrôle des mauvaises herbes (Abu-Irmaileh, B.E. 1991a). Une solarisation post-plantation utilisant le BPE a contrôlé les mauvaises herbes dans les vergers nouvellement établis et accru la croissance des plantules d'amandiers, des oliviers et des vignes, mais la solarisation avec le CPE occasionne des blessures sévères aux plantules de vignes (Abu-Irmaileh, 1994). La solarisation du sol pendant 2-4 semaines prévient presque complètement l'émergence de plusieurs mauvaises herbes annuelles (*Digitaria sanguinalis*, *Malva*, *Echinochloa*, *Chenopodium*, *Amaranthus retroflexus*, *Solanum nigrum*) jusqu'à 4 cm (Elmore, 1983). La germination des semences de mauvaises herbes après la solarisation du sol a fortement baissé dans les couches superficielles et avait augmenté sur les échantillons de sol des couches plus profondes (Horowitz *et al.*1983). Comparées aux mauvaises herbes tolérantes à la chaleur, les mauvaises herbes sensibles à la chaleur étaient liquidées par une courte période de solarisation, et les semences détruites dans les couches les plus profondes du sol (Standifer *et al.* 1984). *Conyza* et *Malva* étaient relativement plus tolérantes à la solarisation du sol (Horowitz *et al.* 1983). Les semences de mauvaises herbes en dormance (Egley, 1983) et celles enterrées dans les couches les plus profondes ((Horowitz *et al.* 1983; Rubin et Benjamin, 1984, Standifer *et al.* 1984) échappent aux effets de la solarisation du sol. Les lianes, (*Convolvulus arvensis L.*) ont émergé dans les parcelles solarisées par le BPE. Le souchet *C. rotundus* L. a survécu à 80°C pendant 30 mn, alors que les rhizomes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. et *Sorghum halepense* (L.) Pers. étaient sensibles (Rubin et Benjamin, 1984). La solarisation du sol contrôle efficacement les genêts, *Orobanche* spp. (Jacobson *et al.* 1980; Abu-Irmaileh, 1991b), mais les espèces *de Cuscuta* étaient tolérantes (Abu-Irmaileh et Thahabi, 1997). La solarisation du sol a réduit la germination des semences de cuscute laissées à la surface du sol (Haidar et Iskandarani, 1977). La banque de semences de mauvaises herbes dans le sol a été considérablement réduite par la solarisation du sol. L'effet peut être dû à un ou la combinaison des mécanismes suivants: élimination directe des semences des mauvaises herbes par la chaleur, élimination microbienne indirecte des semences affaiblies par une chaleur sub-létale, élimination des semences stimulée à germer dans les sols humides couverts de paillis plastiques, et élimination des semences en germination dont la dormance était levée.

SOLARISATION DU SOL COMME UNE COMPOSANTE DE LA GESTION INTEGREE DES ORGANISMES NUISIBLES (IPM)

En plus de l'effet létal de l'énergie solaire sur les semences des mauvaises herbes et les autres organismes nuisibles du sol, la solarisation du sol est une méthode éco-compatible de gestion des mauvaises herbes, et peut être considérée comme une méthode de substitution aux fumigènes du sol, comme le bromure de méthyle Bromure de méthyle (MeBr), qui est toxique, coûteux et polluant pour l'environnement (Saghir, 1997). Avec l'interdiction formelle de l'utilisation du Bromure de méthyle comme un fumigant pré-semis, un accent croissant sera mis sur les programmes de gestion intégrée des organismes nuisibles (IPM) pour la gestion des pathogènes, nématodes et mauvaises herbes, qui pourront soutenir les opportunités additionnelles pour pratiquer la solarisation du sol. Les facteurs qui déterminent l'utilisation de la solarisation du sol dans la lutte intégrée (IPM) incluent sa compatibilité avec les pratiques standards de production et avec d'autres tactiques de gestion des organismes nuisibles, l'efficacité contre des organismes nuisibles spécifiques, la rentabilité et les interactions synergiques avec d'autres tactiques de gestion des organismes nuisibles (Chellemi, 1997).

La solarisation du sol a été efficacement combinée avec les agents de contrôle biologique incluant *Talaromyces flavus*, *Trichoderma harzianum* Rifai, et les champignons à mycorhizes *Glomus fasciculatum*, pour le contrôle des maladies des plantes (Eldad *et al.* 1980; Tjamos et Fravel, 1995). Des interactions synergiques ont été également observées entre la solarisation du sol et les agents de contrôle biologique des organismes nuisibles (une combinaison de la chaleur sub-létale au laboratoire avec l'application de *Trichoderma harzianum* a amélioré le contrôle de *Rosellinia necatrix* dans le sol et dans les vergers de pommes), les amendements organiques, et les fumigants chimiques. L'acceptation de la solarisation du sol comme une méthode de gestion des organismes nuisibles avec des activités spécifiques liées au site et à l'organisme nuisible pourra faciliter son intégration dans les systèmes IPM.

La solarisation du sol a commencé en Jordanie déjà en 1978 à partir de thèmes de recherche d'étudiants (Al-Radadd, 1979). Plusieurs thèmes de recherche ont prouvé son efficacité comme moyen de sauvegarde de l'environnement dans la gestion de différentes organismes nuisibles liés au sol, incluant les phytopathogènes, les nématodes, les plantes parasites à fleurs et les mauvaises herbes (Abu-Irmaileh, 1991a et 1991 b; Barakat, 1987; Abu-Irmaileh, 1994; Abu - Irmaileh et Thahabi, 1997). Comme la technique peut être appliquée au niveau du champ, son transfert a commencé dans le sud de la Vallée du Jourdain à la fin des années 1980 pour le contrôle de l'*Orobanche* et des mauvaises herbes dans les cultures maraîchères. A présent, le niveau d'adoption estimé de cette technique couvre environ 40% des aires cultivées dans la Vallée du Jourdain, spécialement là où l'irrigation goutte à goutte et le paillage avec du plastique noir sont accessibles. Il remplace progressivement le bromure de méthyle en agriculture protégée, c'est à dire les tunnels et les abris plastiques.

Depuis 1998, la Jordanie a reçu le support du Fond Multilatéral de Protection de la Couche d' Ozone, sous le protocole de Montréal. La solarisation du sol était donc reconnu comme une alternative viable au Bromure de méthyle. Son adoption a été fortement promue dans la Vallée Centrale du Jourdain où l'utilisation du Bromure de méthyle était la plus intensive. La technologie a été facilement adoptée par les agriculteurs et même dans une année sèche comme 2001, environ 75% des agriculteurs l'ont pratiquée (Hasse, 2001).

BIBLIOGRAPHIE

Abdel-Rahim, M.F., Satour, M.M., Mickail, K.Y., El-Eraki, S.A., Grinstein, A., Chen, Y. & Katan, J. 1988. Effectiveness of soil solarization in furrow- irrigated soils. *Plante Disease* 72: 143-146.

Abu Gharbieh, W.I., Saleh, H. & Abu-Blan, H. 1990. Use of black polyethylene for soil solarization and post plante-mulching. 229-242. *In* DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.KL., eds. *Proc. of the First Int. Conference on Soil Solarization.* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO Plante Protection and Production Paper No, 109. Rome, 1991.

Abu-Gharbieh, W. 1997. Pre- and post-plante soil solarization. pp. 15-34. In Stapleton, J.J., DeVay, J.E. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the Second Int. Conference on SoilSolarization and Integrated Management of Soil-borne pests.* Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March 1997. FAO Plante Protection and Production Paper No.147. Rome, 1998.

Abu-Irmaileh, B.E. 1990. Weed control in vegetables by soil solarization. pp.155-166. *In* DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & C.L. Elmore, eds. *Proc. of the First Int.Conference on Soil Solarization.* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO Plante Protection and Production Paper No. 109. Rome, 1991.

Abu-Irmaileh, B.E. 1991a.Weed control in squash and tomato fields by soil solarization in the Jordan Valley. *Weed Res.* 31(3): 125-133.

Abu-Irmaileh, B.E. 1991b. Soil solarization controls broomrapes (*Orobanche* spp.) in host vegetable crops in the Jordan Valley. *Weed Tech.* 5: 575-581.

Abu-Irmaileh, B.E. 1994. Weed control by soil solarization in newly established fruit trees. *Dirasat 21*(5): 207-219.

Abu-Irmaileh, B.E. & Thahabi, S. 1997. Comparative solarization effect on Cuscuta and Orobanche species. pp.227-239. *In* Stapleton, J.J., DeVay, J.E. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the Second Int. Conference on Soil Solarization and Integrated Management of Soil-borne pests.* Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March 1997. FAO, Plante Protection and Production Paper No. 147. Rome, 1998.

Al-Raddad, A. M. 1979. Soil disinfestations by plastic tarping. Faculty of Agriculture, University of Jordan, Amman. (M.Sc. thesis)

Anon. 1984. Plastic mulch: the choice of film. *Plasticulture* 62: 37-44.

Ashworth, L.J. & Gaona, J. 1982. Evaluation of clear polyethylene mulch for controlling Verticillium wilt in established pistachio nut groves. *Phytopathology* 72: 243-246.

Baker. K.F. 1962. principles of disinfestations of heat-treated soil and planteing material. *J. of the Australian Institute of Agricultural Sciences* 28: 118-126.

Baker, K.F. & Cook, R.J. 1974. *Biological control of plante pathogens.* San Francisco: W. H. Freeman and Company.

Barakat, R.M. 1987. comparative effect of different colors of polyethylene tarping on soil borne pathogens. University of Jordan, Amman. (M.Sc. thesis)

Barakat, A. R, Al-Khwaldeh, M. Zobaidi., Heyari, M., Faza'a, S. Abduljabbar,Y., Salameh, Z., Al-Mahamid, & Sa'eed, W. 2001. *GTZ-IPM and phase-out of the use of Bromure de méthyle in Jordan.* The Third Farmers' Visits for 2001 Season in the Jordan Valley. GTZ-NCARTT. 29 pp. Amman, Jordan.

Braun, M. 1987. *Solarization for sanitation - Possibilities and limitations, based on experiments in southern Germany and Sudan.* Gesunde Pflanzen (Germany, F.R.) 39: 30-309.

Brazelton, R. W. 1968. *Sterilizing soil mixes with aerated steam.*pp.35. *In* Hartman, H.T. and Kester, D.E. 1975. Plante propagation, Principles and Practices. 3rd edn. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.

Brock, T.D. 1978. *Thermophylic Microorganisms and Life at High Temperatures.* Springer-Verlag, New York.

Burrows, W.C. & Larson, W.E. 1962. Effect of amount of mulch on soil temperature and early growth of corn. *Agronomy J.* 54: 19-23.

Chellemi, D.O. 1997. Contribution of soil solarization to integrated pest management systems for field production. pp. 322-332. *In* Stapleton, J.J., DeVay, J.E. & Elmore, C.L., eds.

Proc. of the Second Int. Conference on Soil Solarization and Integrated Management of Soil-borne Pests. Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March, 1997. FAO. Plante Protection and Production Paper No.147. Rome, 1998.

Chen, Y. & Katan, J. 1980. Effect of solar heating of soil by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soil Science* 130: 271-277.

DeVay, J.J. 1990. Historical review and principles of soil solarization. In DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the First Int. Conference on* Soil *Solarization,* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO Plante Protection and Production Paper No. 109. Rome, 1991.

DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.L. eds. 1991. *Proc. of the First Int. Conference on Soil Solarization.* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO. Plante Protection and Production Paper No. 109. Rome, 1991.

Dubois, P. 1978. *Plastic in Agriculture.* App. Sci. Publ. Ltd., London.

Egley, G.H. 1983. Weed seed and seedling reduction by soil solarization with transparent polyethylene sheets. *Weed Sci.*31: 404-409.

Eldad,Y., Katan, J. & Chet, I. 1980. Physical, biological, and chemical control integrated for soil-borne diseases in potatoes. *Phytopathology* 70: 119-121.

Gamliel, A., Hadar, E. & Katan, J. 1989. Soil solarization to improve yield of gypsophila in monoculture systems. *Acta Horticulturae* 255: 131-138.

Gamliel, A., & Stapleton, J.J. 1993a. Characterization of antifungal volatile compounds evolved from solarized soil amended with cabbage residues. *Phytopathology* 83: 899-905.

Gamliel, A. & Staplelton, J.J. 1993b. Effect of soil amendment with chicken compost or ammonium phosphate and solarization on pathogen control, rhizosphere microorganisms, and lettuce growth. *Plante Disease* 77: 886-891.

Gamliel, A. & Staplelton, J.J. 1997. Improvement of soil solarization by colatile compounds generated from organic amendments. *Phytoparasitica* 25 (supplement): 315-385.

Greco, N., Di Vito, M. & Saxena, M. 1990. Soil solarization for control of *Pratylenchus thornei* on chickpea in Syria. pp. 182-188. *In* DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the first Int. Conference on Soil Solarization.* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO Plante Protection and Production Paper No.109. Rome, 1991.

Haidar, M. A. & Iskandarani, N. 1977. Soil solarization for control of dodder (*Cuscuta* spp.) and other weeds in cabbage. pp. 264- 274. *In* Stapleton, J.J., DeVay, J.E.& Elmore C.L., eds. *Proc. of the Second Int. Conference on Soil Solarization and Integrated Management of Soil-borne pests.* Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March,1997. FAO, Plante Protection and Production Paper No. 147. Rome, 1998.

Hancock, M. 1988. Mineral additives for thermal barriers plastic films. *Plasticulture* 79: 4-14.

Hasse, V. 2001. *Quarterly Status Report and Activity Forecast Phase-Out of the Use of Bromure de méthyle in Jordan. Period 1 October 2001 to 31 December 2001.* GTZ- NCARTT. Amman, Jordan. 10 pp.

Hasson, A.M., T. Hassaballah, R. Hussain & Abbas, L. 1977. Effect of soil sterilization on nitirification in soil. *J.of Plante Nutrition* 10: 1805-1809.

Hawthorn, B.T. 1975. Effect of mulching on the incidence of *Sclerotinia minor* on lettuce. *New Zealand J. of Experimental Agriculture* 3: 73- 27.

Hillborn, M.T., Helper, P.R. & Cooper, G.R. 1957. Plastic film aids control of lettuce diseases. *Marine Farm Res.* V: 11-17.

Horowitz, M., Rogers, Y. & Herlinger, G. 1983. solarization for weed control. *Weed Sci.* 31:70- 179.

Jacobson, R., Greenberger, A., Katan, J., Levi, M. & Alon, H. 1980. control of Egyptian Broomrape (*Orobanche aegyptiaca*) and other weeds by means of solar heating of the soil by polyethylene mulching. *Weed Sci.* 28: 312-316.

Katan, J. 1981. Solar heating(solarization) of soil for control of soil borne pests. *Annual Review of phytopathology* 19: 211-236.

Katan, J., Greenberger, A., Alon, H. & Grinstein, A. 1976. Solar hating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soilborne pathogens. *Phytopathol.* 66: 683-688.

Katan, J. 1985. solar disinfestations of soils. P. 274-278. In *Proc. 4th Int.Conress of Plante Pathol.* Parker, C.A., Rovira, A.D., Moore, K.J. & Wong, P.T.W., eds. The Amer. Phytopathol.Press, St.Paul, MN, USA.

Katan, J. 1987. Soil solarization , pp. 77-105, In *Innovative approaches to plante disease management,* I. Chet, ed., John Wiley and Sons, New York.

Lai, R. 1974. Soil temperature, soil moisture, and maize yield from mulched and unmulched tropical soils. *Plantes and soils* 40: 129-143.

Mahrer, Y. 1979. prediction of soil temperature of a soil mulched with transparent polyethylene. *J. Appl. Metrerol.* 18: 1263-1267.

Newhall, A.G. 1955. Soil disinfestations of soil by heat, hot water, flooding and fumigation. *Botanical Review* 21: 189-233.

Osman, A.A. 1990. The role of soil solarization in the scope of *Meloidogyne* spp. Integrated control under sandy soil conditions. pp. 189-194. *In* DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the First Int. Conference on Soil Solarization.* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO Plante Protection and Production Paper No. 109. Rome, 1991.

Pullman, G. S., DeVay, J.E. & Garber, R.H. 1981. Soil solarization and thermal death : A logarithmic relationship between time and temperature for four soil-borne plante pathogens. *Phytopathology* 71: 959-964.

Reynolds, S.G. 1970. The effect of mulches on southern blight (*Sclerotium rolfsii*)in dwarf bean *(Phaseolus vulgaris) Tropical Agriculture* 47: 137-144.

Rubin, B. & Benjamin, J. 1984. Solar heating of the soil: involvement of environmental factors in the weed control process. *Weed Sci.* 32: 138-142.

Saghir, A.R. 1997. Soil solarization: an alternative technique for weed management in hot climates. pp. 206-211. *In* Stapleton, J.J., DeVay, J.E. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of theSecond Int. Conference on Soil Solarization and Integrated Management of Soil-borne pests.* Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March 1997. FAO, Plante Protection and Production Paper No.147. Rome, 1998.

Salisburry, F.B. & Ross, C. 1980. *Plante physiology.* Wadsworth Publishing Company, Inc., Belmont, California.

Standifer, L.C., Wilson, W. & Porche-Sorbet, R. 1984. Effects of solarization on soil weed populations. *Weed Sci.* 32: 569-573.

Stapleton, J.J. 1981. *Population dynamics of soil-borne bacteria and fungi as influenced by soil solarization with emphasis on (UY) Agrobacterium* spp. University of California, Davis, USA. (M.Sc. thesis)

Stapleton, J.J. 1990. Physical effects of soil solarization-thermal inactivation of crop pests and pathogens and other soil changes caused by solarization. *In* DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the First Int. Conference on Soil Solarization.*Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO, Plante Protection and Production Paper No. 109. Rome, 1991.

Stapleton, J.J 1997. Modes of action of solarization and biofumigation. pp. 78-88. *In* Stapleton, J.J., DeVay, J.E. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the Second Int. Conference on Soil Solarization and Integrated Management of Soil-borne pests.* Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March 1997. FAO, Plante Protection and Production Paper No. 147. Rome, 1998.

Stapleton, J.J. & DeVay, J.E. 1984. Thermal components of soil solarization as related to changes in soil and root microflora and increased plante growth response. *Phytopathol.* 74: 255-259.

Stapleton, J.J. & DeVay, J.E. 1986. Soil solarization: a non-chemical approach for management of plante pathogens and pests. *Crop Protection* 5: 90-198.

Stapleton, J.J., Quick, J. & DeVay, J.E. 1985. Soil solarization: effect on soil properties , fertilization, and plante growth. *Soil biology and biochemistry* 17: 369-373.

Stapleton, J.J., J.E. DeVay & C. L. Elmore., eds. 1997. *Proc. of the Second Int. Conference on Soil Solarization and Integrated Management of Soil-borne pests.* Aleppo, Syrian Arab Republic. 16-21 March 1997. FAO Plante Protection and Production Paper No.147 Rome, 1998.

Stapleton, J.J. , DeVay, J.E. & Lear, B. 1990. Simulated and field effects of ammonia-based fertilizers and soil solarization on pathogens control, soil fertility and crop growth. pp. 331-342. *In* DeVay, J.E., Stapleton, J.J. & Elmore, C.L., eds. *Proc. of the First Int.Conference on Soil Solarization.* Amman, Jordan, 19-25 February 1990. FAO, Plante Protection and Production Paper No.109. Rome, 1991.

Sundarum, T.K. 1986. Physiology and growth of thermophylic bacteria. P 75-XX. In *Thermopiles: General, Molecular, and Applied Microbiology*, Brock, T.D., ed. John Wiley and Sons, New York.

Tjamos, E.C. & Fravel, D.R. 1995. Detrimental effects of sublethal heating and *Talaromyces flavus* on microsclerotia of Verticillium dahliae. *Phytopathology* 85: 388-392.

Waggoner, P.E., Miller, P.M. & De Roo, H.C. 1960. *Plastic mulching: principles and benefits.* Conn. Agricultural Experimental Station Bulletin, 643.

Gestion de la résistance aux herbicides dans les pays en développement

Bernal E. Valverde

INTRODUCTION

La résistance aux herbicides, la capacité d'une population de mauvaises herbes préalablement sensible à un herbicide à résister à un herbicide et boucler son cycle de vie quand l'herbicide est utilisé à la dose normale dans une situation agricole, a fortement augmenté les années passées (Heap et LeBaron, 2001). Bien que la grande majorité des problèmes de résistance aux herbicides a lieu dans les pays développés, plusieurs mauvaises herbes importantes ont développé des résistances dans les pays en développement avec des impacts économiques importants sur des cultures spécifiques. Cette courte revue vise la gestion de la résistance des mauvaises herbes aux herbicides dans les pays en développement, ainsi la préférence est donnée aux cas observés et les pratiques convenables pour venir à bout de la résistance aux herbicides dans ces pays.

De par le monde les herbicides ont représenté 47 % des 28 billions de dollars US environ de substances agrochimiques vendues dans le monde en 2001 (Agrow, 2002a). Les économies développées (Amérique du Nord, Europe et Japon) représentent sur le marché approximativement 70% des substances agrochimiques (Bryant, 1999). Les ventes en Amérique Latine qui ont montré les plus fortes augmentations en 1996 (Agrow, 1996, 1997a) avaient chuté d'environ 8% (à 3,5 milliards de dollars US) essentiellement à cause de l'effondrement de l'économie en Argentine et de la fluctuation des taux de change au Brésil (Agrow, 2002a). Malgré l'augmentation de la vente de 3 % en 2000, le marché japonais de pesticide a continué sa chute en 2001, résultat de la réduction des plantations de riz, de la pression des prix et des faibles éruptions d'insectes (Agrow, 2002a). En 2001, les sept premières compagnies (Syngenta, Monsanto, Aventis, BASF, Dow AgroScience, Dupont et Bayer) ont vendu environ 22 milliards de dollars US (Agrow, 2002a). L'herbicide le plus utilisé dans le monde est le glyphosate (Woodburn, 2000) qui compte pour environ 11% de la valeur totale du marché des substances agrochimiques (Agrow, 2002b). Le glyphosate représente une part de 67% des 3,9 milliards de dollars US du marché des substances agrochimiques de Monsanto (Agrow, 2001). Il existe aussi plusieurs compagnies dans le monde produisant du glyphosate générique, plusieurs d'entre elles étant basées dans les pays en développement (Woodburn, 2000). D'autres composés largement utilisés sont le paraquat considéré comme la seconde substance agrochimique la plus largement vendue, les triazines et le metolachlore. Dans les pays en développement, le paraquat continue à être l'un des herbicides de choix.

CAS DE RESISTANCE DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

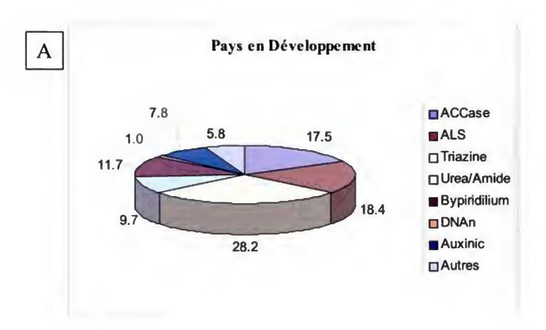
Le premier cas de résistance aux herbicides (au 2,4-D) a été rapporté par Hilton (1957) mais la résistance aux herbicides a commencé à être reconnue seulement après le premier cas de résistance à la triazine dans le *Senecio vulgaris* rapporté par Ryan (1970). Pendant plusieurs années, la résistance à la triazine a été la plus remarquable. Il y a 64 espèces qui ont développé leur résistance à la triazine et à d'autres inhibiteurs du Photosystème II (Heap, 2002). A l'opposé, seules quatre espèces ont été confirmées résistantes au glyphosate bien que cet herbicide a été largement utilisé pendant plus de 25 ans. Actuellement à travers le monde, il y a 261 biotypes résistants confirmés qui appartiennent à 157 espèces (95 dicotylédones et 62 monocotylédones) (Heap, 2002). Des groupes à deux modes d'action (MOA) récemment commercialisés, qui comprennent ceux des herbicides qui inhibent la synthèse des enzymes acétolactases synthétase (ALS), qui incluent les sulfonylurées (SFU), les imidazolinones, les triazolopyrimidines, les

pyridinilbenzoates et les sulfonylaminocarbonyltriazolinones, et les inhibiteurs d'acetyl CoA carboxylase (ACCase) contenus par les aryloxyphenoxy propanoates et les cyclohexanediones, ont contribué à l'aggravation du problème de résistance aux herbicides. Il y a 73 espèces (104 biotypes) résistantes aux herbicides ALS et 28 espèces (59 biotypes) résistantes aux herbicides ACCase (Heap, 2002).

A partir des données de base de Heap (2002), les pays en développement contribuent pour 22% des incidences à la résistance aux herbicides (un total de 465 sont rapportés jusqu'à septembre 2002). Il existe des différences dans la distribution relative des cas de résistance basés sur le MOA entre les pays développés et les pays en développement (Figure 1). Les trois groupes d'herbicides les plus importants (Triazine, ALS et ACCase) qui comptent respectivement pour 74% et 65% des cas de résistance dans les pays développés et dans les pays en développement. Dans les deux groupes de pays, la résistance aux triazines reste la plus fréquente (sur une base de résistance par biotype), mais dans les pays développés, la résistance aux ALS est proportionnellement deux fois aussi fréquente que la résistance au ACCase. Dans les pays en développement, la fréquence des cas de résistances à ces deux MOAs est pratiquement identique. Les Bipyridilium, les herbicides auxiniques et urée/amide en proportion contribuent aussi plus aux cas de résistance dans les pays en développement que dans les pays industrialisés. Une possible explication de cette situation réside dans l'utilisation relativement élevée du paraquat, du 2,4-D et du propanil dans les pays en développement.

EVOLUTION DES MAUVAISES HERBES RESISTANTES

Les populations de mauvaises herbes deviennent résistantes à cause de l'interaction de quelques facteurs clés. Les plantes en général et particulièrement les mauvaises herbes sont variables. Les gènes qui confèrent la résistance sont naturellement présents dans les populations sauvages; les mutations qui provoquent la résistance ne sont pas induites par les herbicides (Jasieniuk et al. 1996). Mais ces gènes se présentent dans les populations sauvages à une très faible fréquence étant donné que, en l'absence d'herbicide, ils ne confèrent pratiquement pas à ces plantes des avantages adaptatifs. La fréquence de ces gènes de résistance est pourtant importante dans la détermination du temps qu'il faut pour que la résistance devienne remarquable une fois qu'on commence à utiliser un herbicide donné. Par exemple, l'accroissement rapide de la résistance aux herbicides ALS est attribué en partie à la forte fréquence des mutations au niveau du site des enzymes cibles et l'existence de plusieurs mutations qui peuvent conférer la résistance (Chaleff et Day, 1984, Devine et Preston, 2000). Preston et Powles (2002) ont déterminé la fréquence des individuels résistants aux herbicides inhibiteurs d'ALS dans les populations de *Lolium rigidum* jamais précédemment exposées à ces herbicides. La fréquence des individus résistants au sulfometuron-methyl et imazapyr varie respectivement de 2.2×10^{-5} à 1.2×10^{-4} et de 1×10^{-5} à 5.8×10^{-5} en fonction de la population. Ces fortes fréquences aident à expliquer l'évolution rapide de la résistance une fois que les populations sont sujettes à la sélection imposée par les herbicides ALS. Malheureusement, la fréquence des individus résistants dans une population de mauvaises herbes n'est pas connue avant l'introduction d'un nouvel herbicide avec un nouveau MOA puisque ces données de base, ne sont pas exigées pour l'homologation des produits et sont rarement produites à des fins de monitoring dans le futur (Moss, 2001).



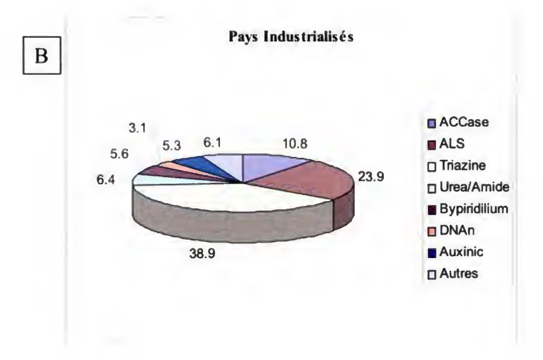


Figure 1. Distribution des cas de résistance aux herbicides dans les pays développés et dans les pays en développement en fonction du mode d'action. (*Basé sur les données compilées par Heap, 2002)*

Deux autres caractéristiques importantes des mauvaises herbes en terme d'évolution de la résistance aux herbicides sont la taille et la viabilité de la banque de semences des mauvaises herbes du sol, et l'adaptation de la mauvaise herbe. La banque de semence du sol peut agir comme un tampon, retardant ainsi l'évolution de la résistance. Ceci parce qu'au cours des années, la banque de semences des mauvaises herbes du sol a été enrichi par des semences déversées par des individus susceptibles prédominants. Dans certains cas, les individus portant des mutations (comme celles qui confèrent la résistance aux herbicides) sont pénalisés pour être moins adaptés

ou pour leur moindre aptitude à survivre en l'absence de l'herbicide. Une aptitude réduite à survivre est difficile à mesurer, mais elle peut être liée à l'affaiblissement du bon fonctionnement de processus physiologiques clés comme la photosynthèse, ou des caractéristiques entières de plante comme la chute de la production de semences ou la réduction de l'aptitude à la compétition. Souvent, les biotypes résistants, ne sont pas moins aptes à la survie que les biotypes normaux susceptibles.

Le facteur le plus significatif qui gouverne l'évolution de la résistance aux herbicides est la pression de sélection imposée par l'herbicide (Jasieniuk *et al.* 1996). Les pressions sélectives plus fortes sont imposées quand nous utilisons, des herbicides à fortes doses, des composés très efficaces et/ou persistants et quand nous les appliquons très fréquemment. Le taux de mortalité augmente avec la pression de la sélection que nous imposons avec l'herbicide. Ainsi, les populations de mauvaises herbes résistantes peuvent être considérées comme un cas d'adaptation rapide à l'évolution (Reznick et Cameron, 2001). L'évolution indépendante de la résistance à un herbicide particulier dans une espèce à travers les sites et le temps a été proposée comme un exemple d'évolution cyclique en réponse à la même force de sélection (l'herbicide) à travers les populations (Levin, 2001). Les populations de mauvaises herbes répondent aussi aux pratiques agricoles, incluant les herbicides, par des changements dans leur composition et leur abondance. Les changements dans les populations de mauvaises herbes sont souvent couplés avec l'utilisation continue du même herbicide. Les espèces qui ne sont pas naturellement affectées par l'herbicide deviennent plus dominantes (Hyvönen et Salonen, 2002), y compris celles (en petit nombre) qui échappent aux herbicides non sélectifs comme le glyphosate utilisé dans les cultures résistantes au glyphosate comme il a été rapporté en Argentine et dans les systèmes de production sans labour (zéro-labour) au Brésil (Merotto *et al.* 1999, Mereno 2001, Valverde 2002, Vita *et al.* 2001). Ces changements dans la flore à un site spécifique ne doivent pas être confondus avec l'évolution de la résistance aux herbicides.

LES MECANISMES DE RESISTANCE

Plusieurs mécanismes confèrent la résistance aux herbicides. Les plus communs et les plus importants sont ceux qui sont liés à l'insensibilité du site cible et l'accroissement du métabolisme de l'herbicide ou sa décomposition en produits inactifs. En plus, la résistance peut être attribuée à la séquestration d'herbicides (ou évitement du fait de la séparation physique ou temporelle de l'herbicide des tissus sensibles ou des sites cibles), et une absorption réduite (Devine et Preston, 2000). Le mécanisme de séquestration a été le plus souvent proposé pour les cas de résistance au paraquat. Par exemple, un biotype résistant au paraquat de mauvaise herbe annuelle *Crassocephalum crepidioides* (Asteraceae) était trouvé en 1990 dans les champs de tomate près de Tanah Rata en Malaisie où le paraquat a été utilisé deux fois par an pendant dix ans (Ismail *et al.* 2001a). Les études physiologiques ont montré que le paraquat n'était métabolisé que ce soit dans les tissus des feuilles d'un biotope susceptible ou d'un biotype résistant. Les plantes des deux biotopes ont absorbé le paraquat de la même manière et la résistance semble être due à un mécanisme de séquestration qui rend le paraquat inactif (Ismail *et al.* 2001a). Récemment, un mécanisme additionnel précédemment identifié, dans les sélections de cultures de tissus, la surproduction de site cible, a été proposé comme le mécanisme de résistance aux graminicides (inhibiteurs ACCase) dans un biotype de l'herbe du Sudan (*Sorghum halepense*) (Bradley *et al.* 2001).

Il y a des cas où plus d'un mécanisme est impliqué dans la résistance aux herbicides pour un seul individu ou dans une population de plantes (résistance multiple). Il est aussi courant que qu'une mauvaise herbe qui a développé la résistance pour un herbicide spécifique montre des résistances à d'autres herbicides de la même famille chimique ou MOA car ils partagent ensemble le même site de fixation. Ainsi, une modification de ce site de fixation entraîne une résistance croisée du site cible. Par exemple, des populations sélectionnées de *Ixophorus unisetus* résistantes à

l'imazapyr (inhibiteurs ALS) au Costa Rica ont aussi une résistance croisée au groupe des herbicides imidazolinone et des SFU (Chaves *et al.* 1997). Lorsque la résistance est assurée par un autre mécanisme, comme une dégradation accrue de l'herbicide, une résistance croisée aux herbicides qui n'ont pas les mêmes modes d'action(MOA) ou d'autres substances chimiques peut apparaître. Par exemple, une population de *Digitaria sanguinalis* de l'Australie qui était sélectionnée et résistante à l'herbicide ACCase fluazifop-*p*-buthyl s'était montrée d'une résistance croisée à l'inhibiteur ALS imazethapyr, bien qu'elle ne soit jamais traitée avec un herbicides ALS. La résistance à l'herbicide ALS n'était pas liée à un site cible, mais probablement à cause du métabolisme élevé de l'herbicide. Mais l'enzyme responsable de la détoxication de l'acide fluazifop dans *Digitaria sanguinalis* est différent de l'enzyme qui détoxifie l'imazethapyr (Hidayat et Preston, 2001). Plus communément, cependant la résistance multiple est conférée par l'accumulation de deux ou plusieurs mécanismes comme dans les populations de *L. rigidum, Alopecurus myosuroides* et *Phalaris minor* (Preston et Mallory-Smith 2001). Des cas extrêmes existent. Un biotype de *L. rigidum* de l'Australie sélectionné pour l'utilisation soutenue d'un certain nombre d'herbicides (diuron, chlorsulfuron et atrazine) et juste à deux expositions au diclofop, a montré une résistance croisée à neuf classes d'herbicides représentant cinq catégories de MOA (Burnet *et al.* 1994). La connaissance du MOA et du mécanisme de résistance est importante dans l'élaboration et la mise en œuvre des pratiques de gestion et de prévention des herbicides. Les regroupements d'herbicides selon leur MOA ont été réalisés comme guide de gestion de la résistance. Les plus connus sont ceux de Herbicide-Resistance Action Committee (HRAC) (Comité d'Action de la Résistance aux Herbicides) et le Weed Science Society of America (WSSA) (Société Américaine de Malherbologie), (Retzinger et Mallory-Smith, 1997; Schmidt, 1997).

En Australie, où les problèmes de résistance sont d'une importance notoire, il est maintenant obligatoire que les étiquettes portent une grande lettre identifiant le MOA de l'herbicide (Powles, 1997). La sélection des produits herbicides pour les mélanges, pour les applications séquentielles ou les rotations est facilitée par une identification simple de la classe du mode d'action à laquelle ils appartiennent.

PREVENTION ET GESTION DE LA RESISTANCE AUX HERBICIDES

La résistance aux herbicides est une indication d'une forte dépendance vis à vis des herbicides dans un système de production particulier. Les pays en développement ne sont pas exclus de la tendance actuelle de dépendance vis à vis des herbicides; ces substances chimiques sont largement utilisées dans les systèmes sophistiqués de production agricole tout comme par les agriculteurs qui ont de faibles ressources. Effectivement, quelques uns des cas troublants de la résistance aux herbicides dans les pays en développement sont apparus dans des endroits et dans des cultures où aussi bien les grands producteurs que les petits producteurs ont embrassé un herbicide unique ou un MOA comme l'outil principal pour éliminer une mauvaise herbe clé. Ceci est le cas pour la résistance au propanil par *Echinocloa colona* en Amérique Centrale, au Mexique et dans quelques endroits de l'Amérique du Sud (Valverde *et al.* 2000) et de la résistance aux graminicides à base d'isoproturon dans *Phalaris minor* en Inde (Malik et Singh, 1995). C'est aussi le cas de la résistance au glyphosate dans l'un des quelques rares cas rapportés. *Eleusine indica* a développé une résistance au glyphosate dans plusieurs régions de la Péninsule de la Malaisie dans les vergers, dans les zones de cultures maraîchères, dans les pépinières et dans les plantations de palmier à huile (Ismail *et al.* 2001b). Dans une ferme de goyaviers, dans le Teluk Intan, après l'échec du glyphosate, pour contrôler les *Eleusine indica* à la dose recommandée de 540 g a.e.ha^{-1} (Lee et Ngim, 2000), des applications expérimentales de l'herbicide à 4.32 kg a.e.ha^{-1} ont permis de contrôler seulement 25% du biotope résistant. La résistance s'est développée sur une courte période (environ trois ans) à partir d'une utilisation intensive de glyphosate (6-7 applications par an à des doses croissantes). D'autres endroits où la résistance a été confirmée ont été exposés à des régimes plus intensifs (jusqu'à dix applications par an pendant cinq ans). La caractérisation de quelques biotypes a indiqué qu'à l'optimum de

température, les semences des biotypes résistants et susceptibles germent de la même façon, mais les biotypes résistants semblent être plus vigoureux et plus productifs que les susceptibles (Ismail *et al.* 2001b). Le mécanisme de résistance au glyphosate dans *Eleusine indica* a été récemment élucidé par les travaux de Baerson et collaborateurs (2002). Les niveaux d'activité de base ou induits par le glyphosate de l'enzyme ciblé par le glyphosate, 5 enolpyruvyshikimate - 3 - phosphate synthase (EPSPS), entre un biotype résistant et susceptible étaient semblables, indiquant que la résistance n'était pas liée à la sur-expression de l'enzyme cible dans le biotype résistant. Les deux biotypes contiennent aussi les mêmes nombres de copies du gènes EPSPS. La résistance a été confirmée comme le résultat d'un enzyme EPSPS modifié qui exhibe une sensibilité réduite au glyphosate. Dans l'EPSPS modifiée, l'amino acide proline est substituée par la serine dans la position 106. Ce mécanisme diffère de celui observé dans la population récemment détectée de *L. rigidum* qui développe aussi la résistance au glyphosate en Australie, dans laquelle une surproduction de l'enzyme EPSPS était associée à la résistance observée (Gruys *et al.* 1999).

La plupart des pratiques de gestion de la résistance aux herbicides discutées ici se réfèrent aux systèmes de cultures annuelles, et la préférence a été donnée aux exemples des pays en développement pour illustrer leur développement et leur exécution. Il existe cependant des cas de résistance dans les plantations et dans les pâturages qui peuvent demander de l'adaptation de pratiques spécifiques pour faire face à la résistance aux herbicides. Une compilation approfondie des pratiques de gestion de la résistance aux herbicides dans la production mondiale de grains est récemment disponible (Powles et Shaner, 2001).

Prévention de la résistance aux herbicides

Dans les zones géographiques ou dans des fermes spécifiques où la résistance aux herbicides n'est pas encore apparue, des efforts doivent être faits pour intégrer les tactiques de contrôle des mauvaises herbes qui peuvent éviter ou retarder la sélection des populations résistantes. Ouis que la pression de sélection est la force maîtresse de l'évolution de la résistance, des tactiques qui diminuent la pression de sélection imposée aux populations doivent être mises en œuvre. La dose d'herbicide, l'efficacité et la fréquence d'application déterminent dans une grande mesure la pression de sélection. La monoculture, l'utilisation intensive d'herbicides avec le même MOA et une réduction du labour caractérisent souvent les systèmes où la résistance se développe (Mortensen *et al.* 2000). Les herbicides très efficaces, utilisés de façon persistante, imposent une pression élevée de sélection qui peut engendrer des populations résistantes aux herbicides juste après quelques générations. Ceci a été bien documenté dans les pays en développement avec les herbicides ALS et les ACCases qui sont spécialement considérés comme disposés à l'évolution de la résistance. Des applications d'herbicide répétées au cours de la même campagne augmentent la pression de sélection, spécialement si une mauvaise herbe germe et émerge en plusieurs vagues et a plus d'une génération par saison. De tels régimes d'herbicides sont responsables de la résistance au propanil par *E. colona* en Amérique Centrale (Valverde *et al.* 2000) et des cas de résistance au paraquat en Malaisie (Itoh *et al.*1992), deux herbicides de contacts sans persistance dans le sol.

Si les agriculteurs doivent compter sur les herbicides, pour contrôler les mauvaises herbes, une approche pratique pour retarder ou prévenir la résistance est d'utiliser des mélanges ou de faire la rotation des herbicides. Conventionnellement, les herbicides sont combinés dans le but d'élargir le spectre de contrôle des mauvaises herbes en réduisant souvent au plus bas la dose des produits dans le mélange. Cependant, pour la gestion de la résistance, il y a d'autres exigences : les deux herbicides dans le mélange doivent être à dose pleine et efficaces sur les espèces de mauvaises herbes cibles et posséder une même persistance mais différents mécanismes d'action et/ou de pistes de dégradation dans la plante (Wrubel et Gressel, 1994). Plusieurs producteurs de riz en Amérique Centrale combinent le propanil et la pendiméthaline pour le contrôle de *E. colona.* La pendiméthaline est un excellent partenaire pour le propanil dans la prévention de la résistance

dans la mesure où elle remplit la plupart de ces exigences. Ainsi, la résistance au propanil a été retardée ou n'est pas apparue dans les champs de riz où le propanil a été régulièrement mélangé avec la pendiméthaline, un herbicide aussi utile comme produit alternatif lorsque la résistance au propanil s'est déjà développée (Garita *et al.* 1995; Garro *et al.* 1991; Riches *et al.* 1996, 1997).

Pour la même raison, la rotation des herbicides aide à retarder la sélection des populations résistantes aux herbicides. Selon les prédictions des modèles en ce qui concerne deux herbicides qui ont différents MOA mais qui ont la même efficacité contre une mauvaise herbe cible, les mélanges sont meilleurs que les rotations annuelles pour retarder l'apparition de résistance aux herbicides (Powles *et al.* 1997). Dans les pays en développement, et surtout avec les herbicides génériques, on trouve souvent des variétés de produits commerciaux qui contiennent la même matière active. Les agriculteurs non avertis quelques fois font la rotation avec ou mélangent des formulations contenant les mêmes matières actives, mais vendues sous différents noms de marque. Les agriculteurs sont aussi souvent trompés par l'introduction de nouveaux produits qui ne sont rien d'autre que des membres d'un même groupe chimique ou de MOA.

L'utilisation de semences certifiées, sans graines de mauvaises herbes tout en évitant la contamination avec les équipements du champ devraient aider à prévenir l'introduction de matériels résistants dans de nouveaux champs ou sur des sites nouveaux. Malheureusement, le prélèvement de semences sur la récolte précédente est chose commune dans les pays en développement. Au Vietnam, par exemple, moins de 5% des semences totales du riz utilisées par les agriculteurs sont certifiées et les semences provenant de l'auto-approvisionnement sont de mauvaise qualité et sont fortement contaminées par les semences de mauvaises herbes (Chin, 2001). La dispersion des mauvaises herbes résistantes à travers les semences contaminées n'est pas très documentée bien qu'il existe des cas suggérant un tel mouvement (Thill et Mallory-Smith, 1997). L'importance du nettoyage complet de la machinerie dans la prévention de la dispersion des mauvaises herbes résistantes a été illustrée par Itoh *et al.* (1997a, 1997b). Un agriculteur au Japon a sélectionné une population résistante de *Lindernia dubia* var. *major* après cinq ans d'utilisation de bensulfuron plus du mefenacet dans un champ de riz. Le mouvement des équipements de champ (outils pour la transplantation et les moissonneuses combinées) ont infestés un champ complètement séparé avec des individus résistants dans un schéma suivant le mouvement des équipements à partir de l'entrée du champ.

Les semences des mauvaises herbes sont caractérisées comme ayant des adaptations pour faciliter leur dispersion et en général il n'y a pas de différences entre la taille ou le poids des semences produites par les plantes résistantes et les plantes susceptibles. Ainsi, les semences des mauvaises herbes des biotypes résistants peuvent naturellement voyager sur de courtes et longues distances aidées par ces adaptations et les agents disséminateurs correspondants. Par exemple, il a été suggéré que les oiseaux migratoires aient joué un rôle important dans la dispersion des semences de *Solanum nigrum* résistant aux triazines en Europe (Stankiewicz *et al.* 2001). Le chardon russe (*Salsola iberica)* est une plante très prolifique adaptée pour la dispersion par le vent. Les plantes matures sortent du sol et sont soulevées par le vent, déversant leurs semences tout au long de leur parcours. Les plantes de chardons russes résistants au SFU infestent de nouvelles aires dans des régions entières de cette façon (Satallins *et al.* 1994).

Alors que les mauvaises herbes à problèmes en général, et celles résistantes aux herbicides en particulier, peuvent être dispersées, il est important de mettre l'accent sur le fait que la pression de sélection est la force maîtresse dans l'apparition de populations résistantes dans une ferme ou dans un champ donné. En effet, les études utilisant les marqueurs moléculaires dans *Lindernia micrantha* ont établi que la résistance aux herbicides ALS s'est développée en multiples évènements et que ce n'était pas le résultat d'une population de base dispersée sur plusieurs localités, que ce soit par le pollen ou par introductions de plantes dans des équipements contaminés (Shibaike *et al.* 1999).

Gestion des mauvaises herbes déjà résistantes aux herbicides

La situation commune à laquelle fait face l'agriculteur est de contrôler les mauvaises herbes qui sont déjà devenues résistantes aux herbicides. Bien que la réponse immédiate est de se tourner vers un herbicide encore actif sur la population de mauvaises herbes, une gestion durable de la résistance peut être réalisée seulement par une intégration de tactiques appropriées basées sur une connaissance adéquate de la biologie et de l'écologie de la mauvaise herbe et du mode d'action de l'herbicide et du mécanisme de résistance. Très rarement on a des informations complètes dans tous ces domaines surtout dans les systèmes agricoles des pays en développement. Mais la compréhension des principes fondamentaux de l'évolution de la résistance aux herbicides, l'exploitation de l'expérience acquise ailleurs dans des cas semblables et le retour à une bonne pratique agricole permettent la mise au point et l'expérimentation de programmes de gestion appropriés.

Plusieurs tactiques agronomiques peuvent aider à limiter la dispersion au niveau local, l'accroissement de la densité et l'impact des populations résistantes. Il sera dit avec insistance que les pratiques de gestion doivent être dirigées vers une diminution de la proportion des semences des individus résistants dans la banque de semences du sol, spécialement pour les espèces dont les semences ont une longévité et une persistance limitées dans le sol. Ainsi, les pratiques qui empêchent la production et la dispersion des semences par les plantes qui ont survécu à toutes pratiques de contrôle durant la campagne agricole peuvent aider au déclin des infestations avec les individus résistants. En Australie par exemple, quelques agriculteurs utilisent des attaches spéciales ou ont modifié leurs moissonneuses pour retenir les semences de *L. rigidum* à la récolte, une pratique évaluée comme une composante importante de gestion des populations qui montrent une résistance multiple (Powles 1997, Gill et Holmes, 1997). Le brûlage des chaumes ou leur incorporation peut aussi détruire les semences des mauvaises herbes ou prévenir la production de semences des plantes qui continuent encore leur maturation à la récolte. Au Taiwan et en Chine, les agriculteurs brûlent la paille de riz après la récolte pour contrôler les mauvaises herbes restantes et pour prévenir la reconstitution des banques de semences du sol (De Datta et Baltazar, 1996). L'incorporation des chaumes, cependant, n'a pas d'effet sur la densité de *E. colona* dans la campagne suivante ou au cours d'une série d'expérimentation en milieu réel conduites pendant trois ans au Costa Rica (Valverde *et al.* 2001a). Pour diminuer la production de semences de *L. rigidum* en Australie, quelques agriculteurs pulvérisent aussi le paraquat à des doses faibles très tard au cours de la campagne agricole, une pratique appelée 'crop topping' (Powles, 1997).

Préparation du sol

La préparation du sol affecte la dynamique des semences de mauvaises herbes et la densité des plantules à la plantation et peut ainsi contribuer à gérer les populations résistantes aux herbicides (Buhler *et al* 1997). Le succès d'une mauvaise herbe annuelle est largement dépendant de la période d'émergence, qui détermine si le plante concurrence efficacement avec ses voisins, si elle est consommée par les herbivores, infectée par les maladies, fleurit, se reproduit et arrive proprement à maturité à la fin de la campagne agricole (Forcella *et al.* 2000). Les systèmes de labour affectent l'émergence des mauvaises herbes en modifiant la composition, distribution verticale et la densité de la banque de semences de mauvaises herbes du sol. Les espèces de mauvaises herbes dont les semences peuvent germer sur ou près de la surface du sol et s'établir ont la plus grande potentialité de prolifération dans les systèmes de labour minimum (Buhler *et al.* 1997).

Dans le labour conventionnel, le labour ou l'hersage à des intervalles avant le semis réalise le contrôle de la population des mauvaises herbes initiales qui dans le cas contraire, émergeraient avec la culture. Un retard de trois semaines dans le semis du blé a permis le contrôle de *L. rigidum* multi-résistant par des herbicides non sélectifs encore efficaces sur la mauvaise herbe ou

par le sarclage avant le semis. Cette pratique cependant peut être limitée par le raccourcissement de la saison disponible pour la croissance de la culture, qui réduit le potentiel de récolte de la culture (Gill et Holmes, 1997). Une plantation retardée pour permettre aux mauvaises herbes d'émerger et d'être éliminées par des herbicides est largement utilisée dans certains pays de l'Amérique Latine pour la gestion du riz sauvage (*Oryza* spp.) et de *E. colona*, spécialement dans le riz pluvial (Fischer, 1996) et a prouvé son utilité dans le contrôle *E. colona* résistant au propanil de (Valverde *et al.*2001a). En Italie, la résistance aux herbicides ALS n'était pas observée dans les champs de riz où la contamination avec le riz rouge obligea les agriculteurs à utiliser la technique du faux lit de semences et d'appliquer l'oxadiazon avant la plantation (Sattin *et al.* 1999).

Si des mauvaises herbes résistantes et susceptibles ont des schémas différents d'émergence dans le champ à cause des différences dans la dormances des semences, des tactiques de contrôle peuvent être adaptées pour éliminer les individus les plus résistants avant la plantation (Dyer *et al.* 1993, Alcocer-Ruthking *et al.* 1992). Les semences de kochia (*Kochia scoparia)* résistantes au SFU germent plus tôt que celles des plantes susceptibles ce qui permet de les contrôler mécaniquement ou avec des herbicides ayant différents MOA avant le semis d'une culture comme le blé (Thompson *et al.* 1994). De même, les plantules de *Solanum nigrum* résistantes à la triazine émergent plus vite et en proportion plus grande que les plantules susceptibles à cause de l'interaction entre la température du sol et des exigences minimum différentielles pour la germination des semences entre les biotypes (Kremer et Lotz, 1998).

Rotation des cultures

Les cultures ont souvent une flore de mauvaises herbes typiques qui leur sont associées. Ainsi, la rotation culturale modifie la composition des espèces de la communauté des mauvaises herbes (Hyvönen et Salonen, 2002). La production intensive en monoculture sélectionne la flore de mauvaises herbes hautement compatible avec le système agricole particulier; ces mauvaises herbes sont souvent très compétitives et difficiles à éliminer. La rotation culturale apporte des changements dans les modes de plantation, les pratiques de labour, les cycles de vie, les caractéristiques de compétition, et la gestion des mauvaises herbes qui désorganisent les niches de régénération des espèces de mauvaises herbe et empêche la reconstruction de celles qui sont hautement adaptées (Buhler, 2002). En Inde où la séquence riz-blé était interrompue par la rotation avec d'autres cultures, l'incidence de *P. minor* résistante à l'isoproturon a été substantiellement faible (Malik et Singh, 1995). *A. myosuroides* est une graminée annuelle qui a développé une résistance à plusieurs herbicides en Europe (Heap, 2002). Une étude récente en France (Chauvel *et al.* 2001) a évalué l'effet des pratiques de gestion sélectionnées incluant la rotation culturale sur une population de *A. myosuroides* résistante au fenoxaprop et au clodinafop. Cette population a montré une résistance croisée à l'herbicide SFU flupyrsulfuron qui n'a jamais été utilisé dans ce champ. Le pourcentage de plantes résistantes aux ACCases n'a pas changé durant les trois ans de rotation bien que les herbicides avec ce mode d'action n'étaient pas utilisés probablement parce que les plantes résistantes ne transportent pas des handicaps propres d'aptitude à la survie comparativement aux plantes susceptibles. La rotation culturale, cependant, a diminué la densité du vulpin des champs, spécialement quand les cultures de printemps étaient introduites dans le cycle de rotation.

Avantage compétitif de la culture

Il existe des pratiques agronomiques additionnelles qui peuvent donner des avantages compétitifs à la culture, en réduisant l'impact des mauvaises herbes qui leurs sont associées et en diminuant les besoins pour les contrôles chimiques. Une attention croissante est accordée à la création et l'identification de variétés de cultures qui ont des aptitudes à la suppression des mauvaises herbes, spécialement dans les cultures à graines comme le blé et le riz. (Coleman *et al.* 2001; Fasoula et Fasoula, 1997). Les variétés de cultures doivent être évaluées selon le système local

de culture, et leurs problèmes de mauvaises herbes. Lemerle *et al.* (2001) ont trouvé un avantage compétitif minimal du rendement-grain des variétés de blé poussant avec *L. rigidum* en Australie ce qui rend nécessaire le développement d'autres tactiques pour accroître la compétitivité de la culture. Garriti *et al.* (1992) a évalué 25 cultivars de riz pour leur aptitude à concurrencer les mauvaises herbes sous des densités faibles et fortes de mauvaises herbes. Les cultivars de grande taille suppriment mieux les mauvaises herbes comparativement aux cultivars de taille intermédiaires et aux cultivars nains. Le cultivar le plus compétitif a diminué le poids sec des mauvaises herbes d'environ 75%. Les cultivars de grande taille, cependant, sont plus susceptibles à la verse ont une faible capacité de tallage et un indice foliaire relativement grand qui fait les feuilles s'ombrage mutuellement. En Colombie, Fisher *et al.* (1997) ont trouvé un cultivar de riz, qui, sous une pression sévère de mauvaises herbes produit suffisamment de grains et était capable de supprimer *E. colona.* La compétitivité des cultivars de riz testés était corrélée avec une augmentation de l'index foliaire, le nombre de talles et l'interception de la lumière par la végétation. Un important lot de littératures et d'expériences pratiques a été obtenu dans l'identification des traits et dans le test des cultivars de riz qui sont allélopathiques aux mauvaises herbes (voir Olofsdotter *et al.* 2002).

L'avantage compétitif de la culture peut aussi être amélioré en augmentant sa densité. En Australie, subséquemment à de forte infestations de *L. rigidum* résistant aux herbicides, les agriculteurs ont largement adopté la pratique d'augmenter la densité de semis du blé de 20-40% pour supprimer la mauvaise herbe (Powles, 1997). Les densités de semis devraient être ajustées selon la compétitivité de la mauvaise herbe dominante à supprimer. Les plus fortes densités de blé accompagnées par des herbicides sélectifs étaient plus nécessaires pour contrôler *Avena ludoviciana* que pour contrôler *Phalaris paradoxa (*Walker *et al.* 2002).

Le riz, avec son système de culture unique, offre des alternatives additionnelles pour rendre la culture plus compétitive. Celles ci incluent la transplantation, le malaxage du sol et la gestion du niveau de l'eau dans le riz inondé ou irrigué (Valverde et Itoh, 2001). D'autres pratiques qui influencent la composition de la flore des mauvaises herbes et la charge des herbicides sont l'association des cultures et l'utilisation de plantes de couverture.

Contrôle chimique alternatif

Une fois que la résistance à un herbicide est évidente pour l'agriculteur, habituellement après que la re-application du même produit à une dose maximale échoue de nouveau dans le contrôle de la mauvaise herbe, la solution typique est de passer à un autre herbicide. La sélection d'herbicides alternatifs doit être judicieuse puisqu'il a été déjà prouvé que le mode d'utilisation de l'herbicide a été tel que la résistance s'est développée. A la surprise des agriculteurs et des conseillers, quelquefois la population résistante sélectionnée devient aussi résistante à un herbicide qui n'a pas été appliqué avant ou qui a été utilisé à une échelle très réduite. En plus des exemples précédents d'autres cas sont édifiants. Quelques populations de *A. myosuroides* sont résistantes à l'herbicide du PS II qu'est chlortoluron à cause de l'accroissement de l'activité de la fonction oxydase mélangée qui conduit à un métabolisme rapide de chlortoluron et de la pendiméthaline (James *et al.* 1995). Ainsi, pour cette population, la pendiméthaline n'est pas un herbicide alternatif viable. Dans certains cas, à la surprise des scientifiques, les agriculteurs continuent à utiliser le même herbicide auquel la principale mauvaise herbe dans le système de production est devenue résistante. Ceci arrive quand l'herbicide continue à contrôler d'autres mauvaises herbes importantes et est très bon marché. C'est le cas de l'utilisation continue du bensulfuron dans le riz en Californie et en Australie, où d'importantes mauvaises herbes ont développé la résistance à l'herbicide ALS (Valverde et Itoh, 2001). Similairement, dans le Costa Rica, quelques agriculteurs continuent d'utiliser le propanil, bien qu'ayant sélectionné un biotype de *E. colona* résistant, étant donné que le propanil contrôle de façon sélective plusieurs mauvaises herbes dicotylédones (Valverde *et al.* 2000).

Un exemple d'utilisation d'herbicides avec un mode d'action alternatifs pour venir à bout des problèmes de résistance dans les pays en développement est illustré par la gestion des mauvaises herbes à feuilles larges dans le soja au Brésil et en Argentine, qui représentent respectivement le deuxième et le troisième plus grands producteurs de soja dans le monde. Selon les statistiques de la FAO, en 2001, le Brésil a planté 13,9 millions d'hectares et l'Argentine, 10,3 millions d'hectares. Pour l'année 2002, la superficie emblavée au Brésil a augmentée d'environ 16 % pour un total de 16,3 millions d'hectares (CONAB, 2002). Au Brésil, les états les plus gros producteurs sont localisés dans le Sud et le Centre- Ouest du pays. Parana et Rio Grande do Sul dans le Sud et Mato Grosso dans le centre-ouest plantent plus de 3 millions d'hectares chacun. Les deux autres plus grands producteurs dans le centre-ouest sont le Goias et Mato Grosso do Sul. Il n'y a pas de soja transgénique résistant aux herbicides qui soit planté légalement au Brésil. Par contre, l'Argentine plante presque entièrement des variétés résistantes au glyphosate (James, 2001). Les principales provinces productrices de soja en Argentine sont Cordoba, Santa Fe et Buenos Aires. En Argentine, sur les 600 millions de dollars US de produits agrochimiques sur le marché en 2001, les deux tiers correspondaient aux herbicides. Comme on s'y attendait, le glyphosate était l'herbicide le plus largement utilisé mais des cas de résistance ne sont pas encore rapportés.

Trois mauvaises herbes à feuilles larges (*Bidens pilosa, Bidens subalternans* et *Euphorbia heterophylla)* ont développé la résistance aux herbicides ALS au Brésil. *Amaranthus quitensis* était aussi devenu résistante à ce groupe d'herbicides dans les provinces de Cordoba et Tucuman en Argentine. En plus, au Brésil, *Brachiaria plantaginea* était confirmée résistante aux herbicides ACCase (Christoffoleti *et al.*2001, Gazziero *et al.* 2000, Vidal et Fleck 1997), résistance apparemment assurée par une mutation du site cible (Cortez *et al.* 2000). Plusieurs études ont été conduites pour comprendre la nature de la résistance, déterminer les modalités de résistance croisée, et élucider le mécanisme de la résistance. Ces études comparent les biotypes suspectés ou connus pour leur résistance aux herbicides ALS dans différentes localités, tous sélectionnés par l'imazethapyr et chlorimuron ethyl ou les deux, respectivement à un biotype susceptible. Les modalités de résistance croisée apparaissent bien uniformes dans les biotypes.

Les rapports initiaux ont montré que *B. pilosa* est devenu résistante aux inhibiteurs ALS (Ponchio *et al.*1997) mais plus tard, il a été confirmé que cette espèce pousse en relation étroite avec *B. subalternans.* Ainsi, les deux espèces sont maintenant confirmées résistantes aux herbicides ALS (Gelmini *et al.* 2001; Christoffoleti 2002). Un biotype de *B. pilosa* de Mato Grosso do Sul, traité avec des herbicides ALS pendant au moins 8 ans montre des indices de résistance RI (basé sur des bio-essais complets) de 40 pour nicosulfuron-ethyl, 60 pour metsulfuron-méthyl et imazethapyr et 175 pour nicosulfuron (Christoffoleti, 2002). Le RI est calculé comme le ratio entre les doses d'herbicides qui inhibent la croissance de 50% (GR_{50}) dans la population d'intérêt sur la valeur de GR_{50} de la population susceptible, de référence. Ce mode de résistance croisée est très documenté pour les deux *Bidens spp. (*Gelmini *et al.* 2002 Monqueiro *et al*, 2000, Monqueiro et Christoffoleti 2001 b). Dans les conditions brésiliennes, les semences de *B. pilosa* survivent dans le sol pendant 3-4 ans (Voll *et al.* 2001). Dans une expérience d'enfouissement des semences, il a été aussi démontré que la germination et la décomposition des semences de *B. pilosa* était plus importante à la surface du sol. Dans une expérience d'enfouissement, il a été aussi démontré que la germination et la pourriture de *B. pilosa* durant les deux premiers mois dans le sol était plus intense à la sur face du sol. Environ 80% des semences à la surface du sol étaient perdus, comme résultat de germination et de pourriture dans les deux premiers mois (saison pluvieuse), les 20% restants ont maintenu leur viabilité jusqu'à la fin de l'expérimentation (un an). Lorsqu'elles sont enterrées à une profondeur de 10 cm, la perte de semence était d'environ 50 pourcent (Carmona et Villas-Bôas, 2001). Ainsi, l'utilisation d'herbicides de pré-levée et d'herbicides de post-levée précoces dans le système sans labour de production de soja peut rapidement faire décroître la banque de semences du sol et aider à contrôler le développement de populations résistantes aux ALS. Les biotypes résistants de ces espèces peuvent être contrôlés par le lactofen, le fomesafen, le benzaton, le glufosinate et

le glyphosate (Christoffoleti, 2002, Gelmini *et al.* 2002). Un biotype susceptible et résistant aux ALS de *B. pilosa* a montré une croissance similaire dans des études en pots (Christoffoleti, 2001).

Tuesca et Nisensohn, (2001) ont évalué la réponse aux herbicides de trois populations de *A. quitensis* en provenance d'un système de sans labour en Argentine qui était prétendument résistantes aux herbicides ALS. Deux de ces populations proviennent de champs qui ont été traités avec l'imazethapyr les 4-5 années passées; la troisième population provient de champs qui ont été traités avec l'imazethapyr en rotation avec le nicosulfuron (en culture de maïs) et le chlorimuron-éthyl pendant la même période. La population susceptible de référence a été collectée dans un champ où le labour conventionnel était pratiqué et où le soja était en rotation avec le maïs et exposé aux herbicides ALS (imazethapyr) seulement une fois, cinq ans avant la collecte des semences. Les deux populations sélectionnées par l'imazethapyr étaient résistantes à cet herbicide, mais pas au chlorimuron-éthyl. La population exposée aux deux herbicides imidazolinone et SFU était résistante aussi bien à l'imazethapyr qu'au chlorimuron-éthyl. La mortalité du biotype susceptible était de 95% à la demi-dose recommandée pour chacun des herbicides et totale à la pleine dose commerciale. Le lactofen, le fomesafen et le bentazon contrôlent *A. quitensis,* résistant aux ALS (Monqueiro et Christoffoleti, 2001b). La résistance aux herbicides ALS dans les populations de *Bidens spp.* et *A. quitensis* est conférée par une enzyme cible non sensible (Monqueiro et Christoffoleti, 2001a).

La résistance de *E. heterophylla* aux herbicides ALS a été également confirmée dans les champs de soja dans les états de Parana, Rio Grande do Sul, Sao Paulo et, indirectement, dans une étude d'efficacité en milieu réel à Mato Grosso do Sul (Gazziero *et al.* 1998, Vidal et Merotto, Jr. 1999, Oliveira *et al.* 2002, Gelmini *et al.* 2001, Melhorança et Pereira, 2000). Les populations résistantes testées depuis sont susceptibles à d'autres herbicides de soja ayant différents modes d'action (Gazziero *et al.* 1998, Vidal et Merotto Jr. 1999). Ainsi, une population de cette espèce collectée dans des champs irrigués de soja de l'état de Sao Paulo qui était résistante aux deux herbicides chlorimuron-éthyle et imazethapyr (RI >20 pour les deux herbicides) était efficacement contrôlée par les herbicides Protox de pré-levée, le fomesafen, lactofen et flumiclorac-pentyl, et par le glufosinate et le glyphosate (Gelmini *et al.* 2001). D'autres herbicides qui contrôlent la résistance des *E. heterophylla* aux ALS sont le sulfentrazone, les herbicides auxiniques, et le paraquat (Gazziero *et al.* 1998, Vidal et Merotto, Jr. 1999). Aucune différence de croissance individuelle n'a été observée entre les plantes susceptibles et les plantes résistantes y compris au niveau de leur production de semences (Vidal et Trezzi, 2000, Brighenti *et al.* 2001, Santos *et al.* 2002). La résistance est conférée par une enzyme ALS modifiée (Oliveira *et al.* 2002) et héritée à travers un gène unique dominant (Vargas *et al.* 2001).

Ainsi, il existe plusieurs options chimiques pour traiter les mauvaises herbes résistantes aux herbicides ALS. Suivant les recommandations locales (EMBRAPA, 2000), le sarclo-binage est exécuté jusqu'à trois fois pendant le cycle cultural, mais avant la floraison. L'application d'herbicides est la méthode de contrôle le plus largement utilisée. Dans la production de soja sans labour, les herbicides recommandés avant la plantation sont le paraquat, le 2,4-D, une formulation d'un mélange de paraquat et de diuron, et le glyphosate ou le sulfosate. Le chlorimuron-éthyl est aussi recommandé pour contrôler *Raphanus sativum, Senecio brasilienses et Bidens pilosa* où il n'est pas apparu de résistance. Plusieurs herbicides de pré-plantation (PRE) ou de post-levée (POST), des herbicides utilisables dans la culture sont disponibles; plusieurs d'entre eux sont efficaces sur les espèces résistantes aux ALS. Ceux ci incluent les herbicides Protox POST, l'acifluorfen-sodium, le fomesafen, le lactofen et les PRE sulfentrazone; les inhibiteurs PRE de la synthèse de très longues chaînes d'acides gras, alachlore et métolachlore ; les herbicides PS-II, le bentazon (POST), le cyanazine (PRE), le linuron (PRE), le metribuzin (pré-plantation incorporé (PPI) ou PRE); les inhibiteurs de tubulin-polymerization, la pendiméthaline (PRE), le trifluralin (PPI); et l' inhibiteur de la synthèse du pigment, le clomazone (PRE, à au moins 150 jours avant plantation). Malgré l'accroissement des problèmes

de résistance, les deux groupes de mode d'action les largement utilisés restent encore ceux des inhibiteurs ALS y compris le POST chlorimuron-éthyl, le cloransulam-méthyl, l'oxasulfuron et l'imazéthapyr, le PPI diclosulam et le flumetsulam, et l'imazaquin (appliqué en PPI ou PRE) et les inhibiteurs ACCase, clethodym, fenoxaprop-éthyl, le fluazifop-p-butyl, le propaquizafop, le quizalofop-p-éthyl, le sethoxydim et le tépraloxydim.

Une autre option chimique pour gérer la résistance des mauvaises herbes aux herbicides est l'utilisation de synergistes spécifiques. Ces composés, mélangés aux herbicides élèvent très fortement le niveau d'activité biologique comparativement à celui de chaque composé utilisé séparément. Les synergistes sont utiles quand la résistance provient de l'élévation du métabolisme mais sont inefficaces contre résistance du site cible. Ils peuvent être utilisés comme des composantes de mélange au niveau du réservoir ou comme une partie d'une formulation pour surmonter la résistance. A la connaissance de l'auteur, la seule situation pratique dans laquelle un synergiste a été utilisé commercialement pour contrôler la résistance d'une mauvaise herbe a été le mélange de piperophos ou anilofos avec du propanil pour contrôler la résistance au propanil de *E. colona*.

Depuis quelques années maintenant, il a été reconnu que quelques insecticides organophosphorés et des carbamates bloquent l'action de l'aryl-acylamidase (AAA), qui est responsable de l'hydrolyse du propanil dans le riz (Fear et Still, 1968, Matsunaka 1968, Leah *et al.* 1994). Quand ces insecticides sont appliqués juste avant ou après le propanil, le riz peut être endommagé par l'herbicide car l'insecticide empêche le métabolisme du propanil. Les mécanismes de résistance d'*E. colona* au propanil impliquent une activité accrue de AAA (Leah *et al.* 1994, 1995). Sur la base des connaissances des mécanismes de résistance, les herbicides organophosphorés piperophos et anilofos qui sont sélectifs du riz, ont été mis au point comme des synergistes (Caseley *et al.* 1996, Valverde *et al.* 1997, 1999). Des mélanges de ces herbicides à de très faibles doses avec du propanil aussi à une dose réduite (souvent 1,76 kg ha^{-1} contre 3,84 kg ha^{-1} la dose communément utilisée) ne sont pas plus phytotoxiques à la culture que le propanil seul, mais arrive à surmonter la résistance au niveau de *E. colona* (Valverde *et al.* 2000). Une formulation contenant du piperophos et du propanil a été premièrement utilisée de façon commerciale au Costa Rica et puis dans d'autres régions de l'Amérique Latine; anilofos a été utilisé en mélanges dans les réservoirs (Valverde 1996). Les deux mélanges étaient largement acceptés par les producteurs de riz (Valverde et Itoh, 2001).

D'autres tentatives ont été menées pour créer des synergistes pour combattre la résistance des mauvaises herbes aux herbicides. Plus fréquemment, cependant les synergistes sont utilisés comme un outil pour élucider les mécanismes de résistances. Des agents chélateurs de cuivre ont été testés comme des synergistes possibles du paraquat et d'autres herbicides générateurs d'oxydants (Rogachev *et al.* 1998). Des chélateurs capables de déplacer le cuivre et/ou le zinc du superoxide dismutase et le cuivre de l'ascorbate peroxidase pourraient être d'une utilité pratique pour contrôler la résistance au paraquat des biotypes de *Conyza bonariensis* dont la résistance est liée à des niveaux élevés, constitutifs et/ou induits par un herbicide, d'enzymes anti oxydants (Ye et Gressel, 2000, Ye *et al.* 2000). L'herbicide aminotriazole amitrole inhibe le métabolisme de l'acide diclofop dans un biotype résistant (SLR 31) de *L. rigidum*, dont la résistance au dichlofop a été conférée aussi bien par l'insensibilité du site cible que un métabolisme accru. L'amitrole a synergisé l'effet de diclofop-méthyl aussi bien sur biotype résistant que sur le biotype susceptible (Preston et Powles, 1998).

Cultivars résistants aux herbicides

Les cultivars résistants aux herbicides (CRH) produits par des technologies génétiques ou par mutation sont commercialement disponibles. L'introduction de ces cultivars a permis aux producteurs d'utiliser de nouvelles alternatives chimiques pour contrôler les espèces difficiles à tuer et les mauvaises herbes résistantes aux herbicides. Environ 52,6 millions d'hectares de

cultures transgéniques ont été plantées dans le monde en 2001, ce qui représente une augmentation de 19% (ou 8,4 millions ha) par rapport à l'année précédente. Vingt cinq pour cent de cette surface (équivalent à 13,5 millions ha) ont été cultivés dans les pays en développement, surtout en Argentine où 11,8 millions ha de soja et de maïs transgéniques étaient plantés en 2001. Les cultures génétiquement modifiées (GM) sont aussi plantées en Chine (le plus souvent le coton Bt) et en Afrique du Sud, Mexico, Bulgarie, Uruguay, Roumanie et en Indonésie. Globalement, les principales cultures génétiquement modifiées sont le soja, le maïs, le coton, et le colza. Presque 80% des cultures génétiquement modifiées qui sont plantées sont celles porteuses de gènes qui confèrent la tolérance aux herbicides (James, 2001).

En relation avec la résistance des mauvaises herbes, il y a aussi des inquiétudes concernant l'utilisation très répandue des CRHs (voir Duke 1996 pour une bibliographie complète), incluant celles de l'agriculture dans les pays en développement et la biodiversité (Maden *et al. 2002,* Olofsdotter *et al.* 2000, Riches et Valverde, 2002). Plusieurs pays en développement manquent de législation propre pour les CRHs et la FAO a fait un effort pour mettre au point de simples guides pour aider ces pays à prendre des décisionq sur les introductions et la vulgarisation de ces cultures (Valverde *et al.* 2001b ; FAO, 2001). En plus des nouvelles pressions de sélection imposées par l'utilisation de nouvelles substances chimiques dans les CRHs, l'un des risques les plus discutés sur ces cultures en terme de résistance des mauvaises herbes aux herbicides est la possibilité que des gènes de résistance se déplacent des cultures aux espèces ou à des biotypes de mauvaises herbes compatibles et le HRC qui devient lui même une mauvaise herbe difficile à éliminer lorsqu'il se développe en repousse dans une rotation culturale.

Intégration des pratiques de contrôle

Comme il a été indiqué par Mortensen *et al.* (2000), nous devons aller au delà de la notion qui considère les mauvaises herbes comme étant des problèmes qui peuvent être seulement réglés par des herbicides mais qui peuvent être gérés à travers un bon schéma de systèmes culturaux. Même les problèmes de résistance aux herbicides les plus préoccupants auraient pu être prévenus par une stratégie appropriée de gestion intégrée des mauvaises herbes, et maintenant nous sommes forcés de faire un retour sur le passé pour revenir à une bonne agronomie et à une gestion intégrée des mauvaises herbes pour les résoudre. Il est important que les agriculteurs réalisent l'impact négatif de la résistance aux herbicides et comprennent la logique d'intégration des tactiques de contrôle intégré comme base de leur acceptation. Nous devons aussi démontrer que les alternatives proposées sont profitables et réalistes. Les opportunités pour la gestion intégrée sont illustrées avec peut être les deux cas les importants de résistance aux herbicides dans le monde en développement : *P. minor* dans le blé en Inde et *E. colona* dans le riz dans plusieurs pays de l'Amérique Latine.

P. minor est considérée comme la mauvaise herbe la plus inquiétante en hiver pour le blé en Inde, où il est cultivé en hiver après la production de riz en été (Malik et Singh, 1995). La mauvaise herbe est très compétitive avec le blé et à des niveaux d'infestation élevés, il peut en résulter une destruction complète de la culture (Singh *et al.* 1999). Depuis 1982, les producteurs indiens de blé ont fait confiance à l'isoproturon, un herbicide à large spectre, dérivée phenylurée pour le contrôle de *P. minor*, car il est moins cher et efficace, à large gamme d'application, flexible dans la méthode d'application et à large spectre dans la destruction des mauvaises herbes (Walia *et al.* 1997, Chhokar et Malik, 2002). Mais la pression de sélection imposée par la surdépendance vis à vis de l'isoproturon a conduit à la sélection de populations résistantes qui ont été confirmées au début des années 1990 (Malik et Singh, 1995, Walia *et al.* 1997). Les niveaux de résistance varient parmi les biotypes, certains ont un RIs de 13-18. Après que les premières populations résistantes ont été confirmées dans l'état de Haryana, le problème s'est aggravé dans cette localité et dans les états voisins surtout le Punjab (Singh *et al.* 1998b). Il a été estimé qu'environ 1 million ha étaient infestés par les biotypes résistants dans ces deux états (Singh *et al.* 1998 c). Les études menées par Singh *et al.* (1997a) ont indiqué qu'une mutation du site cible

de n'est pas impliquée dans le mécanisme de résistance à l'isoproturon dans cette mauvaise herbe. L'absorption et la translocation de l'isoproturon ne diffèrent pas entre les biotypes résistants et susceptibles (Singh *et al.* 1996) mais la résistance paraît être conférée par l'aptitude des plantes résistantes à métaboliser l'herbicide, résultat de l'augmentation de l'activité des enzymes monooxygénases (Singh *et al.* 1998b). A vrai dire, les deux fonctions combinées des inhibiteurs oxydase, 1-aminobenzotriazole (ABT) et piperonyl butoxide (PBO), ont inhibé la dégradation de l'herbicide dans le biotype résistant (Singh *et al.* 1998b, 1998c).

Les herbicides avec un mode d'action alternatifs contrôlent *P. minor* résistant à l'isoproturon y compris les herbicides inhibiteurs d'ACCase que sont tralkoxydim et diclofop-méthyl (Walia *et al.* 1997). Cependant, plus récemment, il a été rapporté que certains biotypes résistants à l'isoproturon montrent une résistance croisée au diclofop-méthyl (Kirwood *et al.* 1997) et probablement au clodinafop-propargyl (Singh *et al.* 1997b, Singh *et al.* 1997b, Singh *et al.* 1998a) sans qu'il soient préalablement utilisé dans le champ, mais restent susceptibles à l'herbicide structurellement et physiologiquement apparenté, qu'est chlorotoluron, qui peut être utilisé sélectivement dans le blé. D'autres herbicides sont aussi efficaces dans le contrôle de *P. minor* résistant à l'isoproturon: fenoxaprop-*p*- éthyl, sethoxydim, tralkoxydim, sulfosulfuron et les dinitroanilines, trifluralin et pendiméthaline (Kirwood *et al.* 1997, Malik et Yadav, 1997, Chhokar et Malik, 2002).

L'intégration de plusieurs pratiques agronomiques combinées à des herbicides sélectionnés en conséquence a été proposée pour gérer les populations résistantes. Ceux-ci incluent : le semis de cultivars de blé compétitifs avec une forte croissance de la végétation la, modification de la date de semis pour permettre un établissement rapide de la culture, fertilisation ponctuelle et appropriée et humidité suffisante pour permettre la croissance de la culture, accroissement de la densité de semis, écartement réduit entre les cultures et semis bi-directionnel pour donner un avantage compétitif à la culture (Singh *et al.* 1999). La rotation culturale, comme il a été mentionnée, a été un important facteur pour retarder l'apparition de populations résistantes à l'isoproturon et peut aussi être utilisée comme élément d'une stratégie de gestion intégrée des. La canne à sucre peut briser la dominance de *P. minor*; le maïs d'hiver, et du fourrage vert, le trèfle (*Trifolium alexandrium*) et la luzerne (*Medicago sativa*) ont aussi fait leur preuve comme plantes de rotation (Singh *et al.* 1999). Enfin, il y a une tendance vers les systèmes de sans labour dans les localités affectées par la résistance à l'isoproturon. Dans ce système, le blé peut être semé en début de saison, quand les températures sont moins favorables pour la germination de *P. minor* permettant ainsi à la culture de prédominer les mauvaises herbes. En plus, des économies de carburant, par rapport aux outillages et à la main d'oeuvre ont permis aux agriculteurs pratiquant le sans labour d'avoir les moyens pour se tourner vers les herbicides avec des modes d'action alternatifs qui sont beaucoup plus chers que l'isoproturon (Gill, 2001).

E. colona a développé une résistance au propanil dans le riz en Amérique Centrale, au Mexique, en Colombie, et au Venezuela (Valverde *et al.* 2000) et plusieurs options ont été développées pour contrôler les populations résistantes. En plus, des herbicides, avec des modes d'action alternatifs et l'utilisation des synergistes discutée plus haut, plusieurs pratiques agronomiques ont été testées et utilisées pour la gestion de la résistance, incluant les régimes d'herbicides modifiés (Valverde *et al.* 2001a).

L'élimination des premières populations de *E. colona* qui émergent avant ou avec la culture, réduit substantiellement l'infestation des cultures et le besoin de contrôle chimique supplémentaire. Un herbicide à large spectre comme le glyphosate ou une opération légère de labour peut tuer ces populations initiales avant la plantation. Davantage de bénéfices étaient obtenus en substituant la pendiméthaline au propanil ou d'autres herbicides qui contrôlent efficacement *E. colona* (Valverde *et al.* 2001a). Ceux ci incluent les inhibiteurs d'ACCase tels que le fenoxaprop, le cyhalofop, le sethoxydim, et le clefoxydim, les herbicides ALS (bispyribac-sodium et pyribenzoxim), la pendimethaline, le clomazone, le pretilachlore et

l'herbicide auxinique quinclorac (Valverde *et al.* 2000, 2001a). Malheureusement, la résistance à l'herbicide ACCase fenoxaprop s'est développée à une échelle réduite, suite à l'utilisation de cet herbicide pour contrôler *E. colona* la résistant au propanil (Riches *et al.* 1996).

CONCLUSIONS

Aucun herbicide ou tactique de gestion ne peut seul résoudre un problème particulier de résistance à un herbicide. Aussi bien pour prévenir que pour gérer la résistance une fois qu'elle apparaît, nécessite une connaissance de base de la biologie des mauvaises herbes et la dynamique de leurs populations. Une compréhension fondamentale des forces qui sélectionnent les individus résistants et les processus par lesquels la résistance est accélérée ou retardée, plus l'expérience héritée d'une large gamme de conditions de culture et de pays, devraient mieux nous préparer à combattre la résistance aux herbicides. L'auteur espère que l'information présentée ici pourra stimuler les chercheurs et les praticiens des pays en développement pour documenter, étudier et innover pour des solutions meilleures pour les problèmes locaux des mauvaises herbes.

BIBLIOGRAPHIIE

Agrow. 1996. *World Crop Protection News.* December 13.

Agrow. 1997a. *World Crop Protection News.* February 14 and 28.

Agrow. 1997b. *World Crop Protection News, July 11.*

Alcocer-Ruthling, M., Thill, D.C. & Shafii, B. 1992. Seed biology of sulfonylurea-resistant and -susceptible biotypes of prickly lettuce (*Lactuca serriola*). *Weed Tech.* 6: 858-864.

Baerson, S. R., Rodriguez, D. J., Tran, M., Feng, Y., Biest, N.A. & Dill, G.M. 2002. Glyphosate-resistant goosegrass. Identification of a mutation in the target enzyme 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase. *Plante Physiology* 129: 265–1275.

Bradley, K. W., Wu, J., Hatzios, K.K. & Hagood, E.S., Jr. 2001. The mechanism of resistance to aryloxyphenoxypropionate and cyclohexanedione herbicides in a johnsongrass biotype. *Weed Sci.* 49: 477-484.

Brighenti, A. M., Gazziero, D. L. P., Voll, E., Adegas, F.S. & Val, W.M.C. 2001. Análise de crescimento de biótipos de amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) resistente e suscetível aos herbicidas inibidores da ALS. *Plantea Daninha* 19: 51-59.

Bryant, R. 1999. *Agrochemicals in perspective: Analysis of the worldwide demand of agrochemical active ingredients.* The Fine Chemicals Conference, Kensington, London, 29-30 November, 1999.

Buhler, D. D. 2002. Challenges and opportunities for integrated weed management. *Weed Sci.* 50: 273-280.

Buhler, D. D., Hartzler, R.G. & Forcella, F. 1997. Implications of weed seedbank dynamics to weed management. *Weed Sci.* 45: 329-336.

Burnet, M. W. M., Hart, Q., Holtum, J.A.M. & Powles, S.B. 1994. Resistance to nine herbicide classes in a population of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*). *Weed Sci.* 42: 369-377.

Carmona, R. & da C. Villas-Bôas, H.D. 2001. Dinâmica de sementes de *Bidens pilosa* no solo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 36: 457-463.

Caseley, J. C., Leah, J.M., Riches, C.R. & Valverde, B.E. 1996. Combating propanil resistance in *Echinochloa colona* with synergists that inhibit acylamidase and oxygenases. *Proc. of the Second Int. Weed Control Congress,* Copenhagen, Denmark. 2: 455-460.

Chaves, L., Valverde, B.E. & Garita, I. 1994. Resistencia del pasto Honduras (*Ixophorus unisetus*) a herbicidas inhibidores de la sintetasa del acetolactato. *Resúmenes V Congreso Internacional de Manejo Integrado de Plagas.* San José, Costa Rica, p. 197.

Chin, D. V. 2001. Biology and management of barnyardgrass, red sprangletop and weedy rice. *Weed Biology and Management* 1: 37–41.

Chhokar, R. S. & Malik, R.K. 2002. Isoproturon-resistant littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) and its response to alternate herbicides. *Weed Tech.* 16: 116–123.

Christoffoleti, P. J. 2002. Curvas de dose-resposta de biótipos resistente e suscetível de *Bidens pilosa* L. aos herbicidas inibidores da ALS. *Scientia Agricola* 59: 513-519.

Christoffoleti, P. J. 2001. Análise comparativa do crescimento de biótipos de picão-preto (*Bidens pilosa*) resistente e suscetível aos herbicidas inibidores da ALS. *Plantea Daninha* 19: 75-83.

Christoffoleti, P. J., Kehdi, C. A. & Cortez, M.G. 2001. Manejo da plantea daninha *Brachiaria planteaginea* resistente aos herbicidas inibidores da ACCase. *Plantea Daninha* 19: 61-66.

Coleman, R. K., Gill, G. S. & Rebetzke, G.J. 2001. Identification of quantitative trait loci for traits conferring weed competitiveness in wheat *(Triticum aestivum* L.). *Australian J. of Agricultural Res.* 52: 1235–1246.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2002. *Acompanhamento da safra 2001/02.* Sexto levantamento. Julho/2002.
(also available at http://www.conab.gov.br/politica_agricola/Safra/avalia.html)

Cortez, M. G., Christoffoleti, P.J., Victoria Filho, R. & de Prado, R. 2000. Resistência cruzada e mecanismo de resisência em biotipos de *Brachiaria planteaginea* resistentes a herbicidas inibidores da ACCase. *Resumos. XXII Congreso Brasileiro da Ciência das Planteas.* Daninhas. Foz do Iguaçu, Brasil, p. 498.

De Datta, S. K. & Baltazar, A.M. 1996. Integrated weed management in rice in Asia. pp.145-165, *In* Naylor, R., ed. *Herbicides in Asian rice*: *Transitions in weed management.* Institute for Int. Studies, Stanford University, Palo Alto, California, & the Int. Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Devine, M. D. & Preston, C. 2000. The molecular basis of herbicide resistance. pp. 72-104. *In* Cobb, A.H. & Kirkwood, R.C., eds. *Herbicides and their mechanisms of action.* Sheffield Academic Press Ltd, England.

Duke, S. O., ed. 1996. *Herbicide resistant crops. Agricultural, environmental, regulatory, and technical aspects.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 420 pp.

Dyer, W. E., Chee, P.W. & Fay, P.K. 1993. Rapid germination of sulfonylurea-resistant *Kochia scoparia* L. accessions is associated with elevated seed levels of branched chain amino acids. *Weed Sci.* 41: 18-22.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria. 2000. *Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná - safra 2000/2001.* EMBRAPA, Brazil, 225 pp.

Fasoula, D. A. & Fasoula, V.A. 1997. Competitive ability and plante breeding. *Plante Breeding Reviews* 14: 89-138.

Fischer A. J. 1996. Integrated red rice management in Latin American rice fields. *Proc.of the Second Int. Weed Control Congress.* Copenhagen, Denmark, 2: 53-664.

Fischer, A., Ramírez, J., H. V. & Lozano, J. 1997. Suppression of junglerice *(Echinochloa colona*) (L.) Link by irrigated rice cultivars in Latin America. *Agronomy J.* 89: 516-521.

Forcella, F., Benech Arnold, R. L., Sanchez, |R. & Ghersa, C.M. 2000. Modeling seedling emergence. *Field Crops Res.* 67: 23-139.

Garita, I., Valverde, B. E., Chacón, L.A., de la Cruz, R., Riches, C.R. & Caseley, J.C. 1995. Occurrence of propanil resistance in *Echinochloa colona* in Central America. *Proc.Brighton Crop Protection Conference - Weeds* 1: 193-196.

Garriti, D. P., Movillon, M. & Moody, K. 1992. Differential weed suppression ability in upland rice cultivars. *Agronomy J.* 84: 586-591.

Garro, J. E., de la Cruz, R. & Shannon, P.J. 1991. Propanil resistance in *Echinochloa colona* populations with different herbicide use histories. *Proc. Brighton Crop Protection Conference - Weeds* 3: 1079-1083.

Gazziero, D. L. P., Brighenti, A. M., Maciel, C.D.G., Christofolleti, P.J., Adegas, F.S. & Voll, E. 1998. Resistência de amendoim - bravo aos herbicidas inibidores da enzima ALS. *Plantea Daninha* 16: 117-125.

Gazziero, D. L. P., Christoffoleti, P. J., Brighenti, A. M., Prete, C.E.C. & Voli, E. 2000. Resistência da plantea daninha capim-marmelada (*Brachiaria planteaginea*) aos herbicidas inibidores da enzima accase na cultura da soja. *Plantea Daninha* 18: 169-184.

Gelmini, G. A., Victória-Filho, R., Soares-Novo, M. C. S. & Adoryan, M.L. 2001.Resistência de biótipos de Euphorbia heterophylla L. aos herbicidas inibidores da enzima ALS utilizados na cultura de soja. *Bragantia* 60: 93-99.

Gelmini, G.A., Victória Filho, R., Novo, M.C.S.S. & Adoryan, M.L. 2002. Resistência de *Bidens subalternans* aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase utilizados na cultura da soja. *Plantea Daninha* 20: 319-325 .

Gill, G. S. 2001. Resistance management in Australian wheat and Indian rice/wheat cropping systems. *Japan-Australia Seminar,Utsunomiya University*, 5-7 November 2001, pp. 33-37.

Gruys, K. J., Biest-Taylor, N. A. , Feng, P. C. C., Baerson, S. R., Rodriguez, D. J., You, J., Tran, M., Feng, Y., Kreuger, R.W., Pratley, J.E., Urwin, N.A. & Stanton, R.A. 1999. Resistance of glyphosate in annual ryegrass (*Lolium rigidu*m). II Biochemical and molecular analyses. *Weed Sci. Society of America Abstracts* 39: 163.

Heap, I. & LeBaron, H. 2001. Introduction and overview of resistance. pp. 1-22, *In* S. B. Powles &. Shaner, D.L., eds. *Herbicide resistance in world grains*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Hidayat, I. & Preston, C. 2001. Cross-resistance to imazethapyr in a fluazifop-P-butyl-resistant population of *Digitaria sanguinalis*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 71: 190-195.

Hyvönen, T. & Salonen, J. 2002. Weed species diversity and community composition in cropping practices at two intensity levels – a six-year experiment. *Plante Ecology* 154:73–81.

Itoh, K., Uchino, A., Wang, G.X. & Yamakawa, S. 1997a. Distribution of *Lindernia* spp. resistant biotypes to sulfonylurea herbicides in Yuza Town, Yamagata Prefecture. *J. of Weed Sci. and Tech.* 42 (supplement): 22-23.

Itoh, K., Wang, G. X. & Uchino, A. 1997b. Non-effective problems of *Lindernia* weeds to one-shot application herbicides including sulfonylureas in Tohoku area. *J.of Weed Science and Technology* 42 (supplement): 12-13.

Itoh, K., Azmi, M. & Ahmad, A. 1992. Paraquat resistance in *Solanum nigrum, Crassocephalum crepidioides, Amaranthus lividus* and *Conyza sumatrensis* in Malaysia. *Proc. 1st Int. Weed Control Congress*, Melbourne, Australia, 17-21 February, 1992. 2: 224-228.

Ismail, B. S., Chuah, T. S. & Khatijah, H.H. 2001. Metabolism, uptake and translocation of ^{14}C-paraquat in resistant and susceptible biotypes of *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore. *Weed Biology and Management* 1: 176–181.

Ismail, B. S., Chuah, T.S. & Salmijah, S. 2001. Germination, emergence and growth of glyphosate resistant and susceptible biotypes of goosegrass (*Eleusine indica*). *Proc.II,18th Asian-Pacific Weed Sci. Society Conference*, The Asian-Pacific Weed Science Society, Beijing, pp. 471-481.

James, C. 2001. *Global review of commercialized transgenic crops: 2001.* ISAAA Briefs, 24. Ithaca, NY: Int. Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications. 20 p.

James, E. H., Kemp, M.S. & Moss, S.R. 1995. Phytotoxicity of trifluoromethyl- and methyl-substituted dinitroaniline herbicides on resistant and susceptible populations of black-grass (*Alopecurus myosuroides*). *Pesticide Science* 43: 273-277.

Jasieniuk, M., Brûlé-Babel, A.L. & Morrison, I.N. 1996. The evolution and genetics of herbicide resistance in weeds. *Weed Sci.* 44: 176-193.

Kirkwood, R., Singh, S. & Marshall, G. 1997. Resistance of *Phalaris minor* to isoproturon: Mechanism and management implications. *Proc. 16th Asian-Pacific Weed Sci. Society Conf.*, Kuala Lumpur, Malaysia, 8-12 September 1997. pp. 204-207.

Kremer, E. & Lotz, L.A.P. 1998. Germination and emergence characteristics of triazine-susceptible and triazine-resistant biotypes of *Solanum nigrum*. *J. of Applied Ecology* 35: 302-310.

Lee L. J. & Ngim, J. 2000. A first report of glyphosate-resistant goosegrass (*Eleusine indica* (L) Gaertn) in Malaysia. *Pest Management Science* 56: 336-339.

Lemerle, D., B. Verbeek & Orchard, B. 2001. Ranking the ability of wheat varieties to compete with Lolium rigidum. *Weed Res.* 41: 197-209.

Levin, D. D. 2001. The recurrent origin of plante races and species. *Systematic Botany* 26: 197-204.

Madsen, K. H., Valverde, B. E. & Jensen, J.E. 2002. Risks assessment of herbicide resistant crops: A Latin American perspective using *Oryza sativa* as a model. *Weed Tech.*16:215–223.

Malik, R. K. & Singh, S. 1995. Littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) resistance to isoproturon in India. *Weed Tech.* 9: 419-425.

Malik, R. K. & Yadav, A. 1997. Potency of alternative herbicides against isoprotyron-resistance littleseed canary grass. *Proc. 16th Asian-Pacific Weed Sci. Society Conf.*, Kuala Lumpur, Malaysia, 8-12 September 1997, pp. 208-210.

Melhorança, A. L. & Pereira, F. A. R. 2000. Eficiência do herbicida lactofen no controle de *Euphorbia heterophylla* resistente aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintasa (ALS). *Revista Brasileira de Herbicidas* 1: 53-56.

Merotto, A., Jr., Vidal, R.A. & Fleck, N.G. 1999. Soybean tolerance to synthetic auxin and potential of mixtures with protox-inhibiting herbicides. *Proc. British Crop Protection Conference - Weeds* 1: 319–324.

Monqueiro, P. A. & Christoffoleti, P.J. 2001a. Bioensaio rápido de determinação da sensibilidade da acetolactato sintase (ALS) a herbicidas inibidores. *Scientia Agricola* 58: 193-196.

Monqueiro, P. A. & Christoffoleti, P.J. 2001b. Manejo de populações de planteas daninhas resistentes aos herbicidas inibidores da acetolactato sintase. *Plantea Daninha* 19: 67-74.

Monqueiro, P.A., Christoffoleti, P. J. & Dias, C.T.S. 2000. Resistência de planteas daninhas aos herbicidas inibidores da ALS na cultura da soja (*Glycine max*). *Plantea Daninha* 18: 419-425.

Moreno, R. E. 2001. Soybean weed management in Argentina [abstract]. In *Abstracts of the Third Int. Weed Sci. Congress,* 2000 June 6-11; Foz do Iguassu, Brazil, pp. 520. CD-ROM. Available from the Int. Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Mortensen, D. A., Bastiaans, L. & Sattin, M. 2000. The role of ecology in the development of weed management systems: an outlook. *Weed Res.* 40: 49-62.

Oliveira, M. F., Prates, H.T., Brighenti, A.M., Gazziero, D.L.P., Vidal, R.A.,Vargas, L., Oliveira, R.S., Jr. & Purcino, A. A. C. 2002. Atividade da acetolactato sintase de planteas de milho e de amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) resistentes e suscetíveis ao imazaquin. *Plantea Daninha* 20: 77-82.

Olofsdotter, M., Jensen, L.B. & Courtois, B. 2002. Improving crop competitive ability using allelopathy-an example from rice. *Plante Breeding* 121: 1-9.

Olofsdotter, M., Valverde, B. E. & Madsen, K.H. 2000. Herbicide resistant rice (*Oryza sativa* L.): Global implications for weedy rice and weed management. *Annals of Applied Biology* 137: 279-295.

Ponchio, J. A., Victoria-Filho, R. & Christoffoleti, P.J. 1997. Resistencia de biotipos de *Bidens pilosa* aos herbicidas inibidores da ALS/AHAS. *Resumos. XXI Congresso brasileiro da sciencia das planteas daninhas.* Caxambu, MG, pp.126.

Powles, S. B. 1997. Success from adversity: herbicide resistance can drive changes to sustainable weed management systems. *Proc. Brighton Crop Protection Conference – Weeds.*3: 119-1126.

Powles, S. B. & Shaner, D.L. eds. 2001. *Herbicide resistance in world grains.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 308 pp.

Preston, C. & Mallory-Smith, C.A. 2001. Biochemical mechanisms, inheritance, and molecular genetics of herbicide resistance in weeds. pp. 23-60 *In* S. B. Powles & Shaner, D.L. eds. *Herbicide resistance in world grains*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Preston, C. & Powles, S.B. 1998. Amitrole inhibits diclofop metabolism and synergises diclofop-methyl in a diclofop-methyl-resistant biotype of *Lolinm rigidum. Pesticide Biochemistry and Physiology* 62: 179-189.

Preston, C. & Powles, S.B. 2002. Evolution of herbicide resistance in weeds: initial frequency of target site-based resistance to acetolactate synthase-inhibiting herbicides in *Lolinm rigidnm. Heredity* 88: 8-13.

Retzinger, E. J. & Mallory-Smith, C. 1997. Classification of herbicides by site of action for weed resistance management strategies. *Weed Tech.* 11: 384-393.

Reznick, D. N. & Cameron, K.G. 2001. The population ecology of contemporary adaptations: what empirical studies reveal about the conditions that promote adaptive evolution. *Genetica* 112–113: 183–198.

Riches, C. R. & Valverde, B.E. 2002. Agricultural and biological diversity in Latin America: Implications for development, testing and commercialization of herbicide resistant crops. *Weed Tech.* 16: 200-214.

Riches, C. R., Caseley, J.C., Valverde, B.E. & Down, V.M. 1996. Resistance of *Echinochloa colona* to ACCase inhibiting herbicides. pp. 14-16, *In* de Prado, R., Jorrín, J., García-Torres, L. & Marshall, G. eds. *Proc. of the Int. Symposium on Weed and Crop Resistance to Herbicides,* 3-6 April 1995. University of Cordoba, Spain.

Riches, C. R., Knights, J.S., Chaves, L., Caseley, J.C. & Valverde, B.E. 1997. The role of pendimethalin in the integrated management of propanil-resistant *Echinochloa colona* in Central America. *Pesticide Science* 51: 341-346.

Rogachev, I., Kampel, V., Gusis, V., Cohen, N., Gressel, J. & Warshawsky, A. 1998. Synthesis, properties, and use of copper-chelating amphiphilic dithiocarbamates as synergists of oxidant-generating herbicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 60:133-145.

Santos, J. B., Procópio, S.O., Silva, A.A. & Costa, L.C. 2002. Produção e características qualitativas de sementes de planteas daninhas. *Plantea Daninha* 20: 237-241.

Sattin, M., Berto, D., Zanin, G. & Tabacchi, M. 1999. Resistance to ALS inhibitors in weeds of rice in north-western Italy. *Proc. Brighton Crop Protection Conference Weeds,* Brighton, UK, 3: 783-790.

Shibaike, H., Uchino, A. & Itoh, K. 1999. Genetic variation and relationships of herbicide-resistant and -susceptible biotypes of *Lindernia micrantha. Proc. Brighton Crop Protection Conference – Weeds* 1: 197-202.

Singh, S., Kirkwood, R.C. & Marshall, G. 1999. Biology and control of *Phalaris minor* Retz. (littleseed canarygrass) in wheat. *Crop Protection* 18: 1-16.

Singh, S., Kirkwood, R. C. & Marshall, G. 1997a. Effects of isoproturon on photosynthesis in susceptible and resistant biotypes of *Phalaris minor* and wheat. *W ed Res.* 37: 315-324.

Singh, S., Kirkwood, R. C. & Marshall, G. 1997b. New management approaches for isoproturon-resistant *Phalaris minor* in India. *Proc. Brighton Crop Protection. Conference – Weeds.* 1: 357-362.

Singh, S., Kirkwood, R.C. & Marshall, G. 1998b. Effect of ABT on the activity and rate of degradation of isoproturon in susceptible and resistant biotypes of *Phalaris minor* and wheat. *Pesticide Sci.* 53: 123-132.

Singh, S., Kirkwood, R. C. & Marshall, G. 1998c. Effect of the monooxygenase inhibitor piperonyl butoxide on the herbicidal activity and metabolism of isoproturon in herbicide resistant and susceptible biotypes of *Phalaris minor* and wheat. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 59: 143-153.

Singh, S., Kirkwood, R. C. & Marshall, G. 1998a. Control of isoproturon resistant biotypes of *Phalaris minor* by chorotoluron and clodinafop-propargyl. *Resistance Pest Management* 10: 5-18.

Singh, S., Kirkwood, R. C. & Marshall, G. 1996. Uptake, translocation and metabolism of isoproturon in wheat, susceptible and resistant biotypes of *Phalaris minor. Proc. Second Int. Weed Control Congress,* Copenhagen, Denmark, 25-28 June 1996, 2: 529-534.

Stankiewicz, M., Gadamski, G. & Gawronski, S.W. 2001. Genetic variation and phylogenetic relationships of triazine-resistant and triazine-susceptible biotypes of *Solanum nigrum*-analysis using RAPD markers. *Weed Res.* 41: 287-300.

Stallings,G. P., Thill, D, & Mallory-Smith, C.A. 1994. Sulfonylurea-resistant Russian thistle (*Salsola iberica*) survey in Washington state. *Weed Tech.* 8: 258-264.

Thill, D. C. & Mallory-Smith, C.A. 1997. The nature and consequence of weed spread in cropping systems. *Weed Sci.* 45: 337-342.

Thompson, C. R., Thill, D. C. & Shafii, B. 1994. Germination characteristics of sulfonylurea-resistant and -susceptible Kochia (*Kochia scoparia*). *Weed Sci.* 42: 50-56.

Tuesca, D. & Nisensohn, L. 2001. Resistencia de *Amaranthus quitensis* a imazetapir y clorimurón-etil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 36: 601-606.

Valverde, B. E. 2002. Weed Management in Latin America. *Pesticide Outlook* 13: 79-81.

Valverde, B. E. 1996. Management of herbicide resistant weeds in Latin America: The case of propanil-resistant *Echinochloa colona* in rice. *Proc.Second Int. Weed Control Congress,*Copenhagen, pp. 415-420.

Valverde, B. E. & Itoh, K. 2001. World rice and herbicide resistance. pp. 195-249. *In* Powles, S. R. & Shaner, D. eds. *Herbicide Resistance in World Grains.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Valverde, B., Garita, I., Vargas, E., Chaves, L., Ramírez, F., Fischer, A.J. & Pabón, H. 1999. Anilofos as a synergist to propanil for controlling propanil-resistant junglerice, *Echinochloa colona. WSSA Abstracts* 39: 318.

Valverde, B. E., Chaves, L., Garita, I., Ramírez, F., Vargas, E., Carmiol, J., Riches, C.R. & Caseley, J.C. 2001a. Modified herbicide regimes for propanil-resistant junglerice control in rain-fed rice. *Weed Sci.* 49: 395-405.

Valverde, B. E., Madsen, K. H., Streibig, J. E. & Labrada, R. 2001b. Assessment of environmental hazards of herbicide and insect-resistant crops. *Preparation of Guidelines. VALDOR – Values in Decisions On Risk. Proc.* Stockholm. Sweden. pp.132-141.

Valverde, B. E., Chaves, P., Garita, I., Vargas, E., Riches, C.R. & Caseley, J.C. 1997. From theory to practice: Development of piperophos as a synergist to propanil to combat herbicide propanil resistance in Junglerice, *Echinochloa colona. WSSA Abstracts* 37: 33.

Valverde, B. E., Riches, C.R. & Caseley, J.C. 2000. *Prevention and management of herbicide-resistant weeds in rice: Experiences from Central America with Echinochloa colona.* Cámara de Insumos Agropecuarios, Costa Rica, pp. 123.

Vargas, L., Borém, A. & Silva, A.A. 2001. Herança da resistência aos herbicidas inibidores da ALS em biótipos da plantea daninha *Euphorbia heterophylla. Plantea Daninha* 19: 331-336.

Vidal, R. A. & Fleck, N.G. 1997. TRHee weed species with confirmed resistance to herbicides in Brazil. *WSSA Abstracts* 37: 251.

Vidal, R. A. & Merotto, A., Jr. 1999. Resistência de amendoim-bravo aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase. *Plantea Daninha* 17: 367-373.

Vidal, R. A. & Trezzi, M.M. 2000. Análise de crescimento de biótipos de leiteira (*Euphorbia heterophylla*) resistentes e suscetível aos herbicidas inibidores da ALS. *Plantea Daninha* 18: 427-433.

Vitta, J., Tuesca, D., Puricelli, E., Nisensohn, L., Faccini, D. & Leguizamon, E. 2001. Glyphosate-tolerant soybean and weed management in Argentina: present and prospects [abstract]. In *Abstracts of the Third Int. Weed Sci. Congress,* 2000, June 6-11; Foz do Iguassu, Brazil, pp. 343. CD-ROM. Available from the Int. Weed Science Society, Oxford, MS, USA.

Voll, E., Torres, E., Brighenti, A.M. & Gazziero, D.L.P. 2001. Dinâmica do banco de sementes de planteas daninhas sob diferentes sistemas de manejo de solo. *Plantea Daninha*19: 171-178.

Walia, U. S., Bar, L. S. & Dhaliwal, B.K. 1997. Resistance to isoproturon in Phalaris minor Retz. In *Punjab. Plante Protection Quarterly* 12: 138-140.

Walker, S. R., Medd, R. W. , Robinson, G.R. & Cullis, B.R. 2002. Improved management of *Avena ludoviciana* and *Phalaris paradoxa* with more densely-sown wheat and less herbicide. *Weed Res.* 42: 257-270.

Wrubel, R. P. & Gressel, J. 1994. Are herbicide mixtures useful for delaying the rapid evolution of resistance? A case study. *Weed Tech.* 8: 635-648.

Ye, B. & Gressel, J. 2000. Transient, oxidant-induced antioxidant transcript and enzyme levels correlate with greater oxidant-resistance in paraquat-resistant Conyza bonariensis. *Plantea* 211: 50-61.

Ye, B., Faltin, Z., Ben-Hayyim, F., Eshdat, Y. & Gressel, J. 2000. Correlation of glutathione peroxidase to paraquat/oxidative stress resistance in *Conyza* determined by direct fluorometric assay. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 66: 182–194.

Avantages et risques de l'utilisation des cultures résistantes aux herbicides

Kathrine Hauge Madsen & Jens Carl Streibig

INTRODUCTION

La découverte des mauvaises herbes résistantes aux herbicides dans les années 1970 a déclenché un intérêt dans l'imitation de cette évolution non préméditée pour son application dans la création variétale. Le progrès concomitant dans la génétique moléculaire a rendu possible l'incorporation des gènes de résistance des organismes qui n'ont aucune relation, dans une culture qui autrement serait susceptible. En d'autres termes, nous sommes maintenant capables d'adapter la biologie de la culture à la chimie de l'herbicide, alors que nous avions à adapter la chimie à la biologie. Il doit, cependant, être noté que les cultures résistantes aux herbicides (CRHs) étaient premièrement produites par les méthodes traditionnelles de création variétale, alors que la majorité des CRHs actuelles ont été produites par le génie génétique, technologie qui sans le vouloir a placé ces cultures dans le débat houleux entre ceux qui sont pour et ceux qui sont contre l'introduction et l'utilisation commerciale des cultures génétiquement modifiées (GM).

Les CRHs ont été commercialement cultivées depuis 1984, quand le premier cultivar de colza résistant à la triazine (OAC Triton) a été introduit sur le marché canadien. Ce cultivar a été créé par la méthode traditionnelle de création variétale. La résistance à la triazine de *Brassica rapa* L. a fait l'objet d'un backcross dans les variétés commerciales de colza (Hall *et al.* 996).

A l'échelle mondiale, les CRHs Génétiquement Modifiés constituent 85% (incluant les transgènes *Bt* et les gènes et les gènes de résistance aux herbicides) de la superficie totale de 52,5 millions d'hectares de plantes génétiquement modifiées cultivées en 2001 (James, 2001). Les CRHs génétiquement modifiés sont souvent considérés comme des cultures de la première génération et des questions ont été soulevées sur leur utilité et leurs risques supposés pour l'environnement et les consommateurs.

EVALUATION DES AVANTAGES

Au regard des organismes génétiquement modifiés (GM), la plupart des systèmes de réglementation se préoccupent seulement indirectement de savoir si les produits GM sont utiles ou non. Selon la réglementation européenne, (2001/18/EC), il est implicitement supposé que si un produit est commercialement viable, alors, il est utile. Cependant, une seconde définition de l'utilité serait que le produit doit couvrir des besoins importants de la communauté (Madsen *et al.* 2002a). La résistance aux herbicides a été préalablement développée pour le bénéfice de la gestion des fermes, alors que les avantages pour les consommateurs étaient moins évidents.

Les avantages généraux semblent être connectés avec le fait que les CRHs permettent aux agriculteurs d'employer une stratégie flexible et facile de gestion. En plus pour certains CRHs, nous pouvons nous débarasser des herbicides qui ont des profils environnementaux peu favorables. Qui plus est, dans le soja tolérant au glyphosate, par exemple, les coûts dans les programmes de contrôle des mauvaises herbes ont chuté aussi bien dans les cultures conventionnelles que dans les CRHs à cause de la baisse du prix des herbicides.

Le soja résistant au glyphosate a été principalement adopté parce qu'il simplifie le contrôle des mauvaises herbes à l'utilisation d'un seul herbicide et avec une programmation plus flexible que celle recommandée pour les herbicides conventionnels. Parce que le glyphosate est fortement adsorbé par le sol, les risques des effets résiduels sur les cultures suivantes dans la rotation sont négligeables. Le nombre d'applications d'herbicides dans le soja a baisse d'environ 12% sur la période de 1995-1999. Cependant, quand ceci est mesuré en termes de la quantité totale de matières actives utilisée, il semble qu'il y a un accroissement. L'augmentation de l'utilisation d'herbicide dans le soja aux Etats-Unis peut être partiellement expliqué par l'augmentation des superficies emblavées pour cette culture (Carpenter et Giannessi, 2001). Il est cependant difficile d'isoler les effets de l'adoption des cultures GM des autres facteurs qui peuvent affecter l'utilisation des pesticides (Heimlich *et al.* 2000). L'Association Américaine des Producteurs de Soja a déclaré que le soja résistant au glyphosate protège l'environnement à travers les changements des pratiques de labours et d'application des herbicides, et par l'amélioration du contrôle des mauvaises herbes. En plus, les agriculteurs produisent des cultures propres, contenant très peu d'impuretés (Anderson, 2001).

Un autre exemple concerne les variétés de riz résistantes aux herbicides (RH) qui deviennent commercialement disponibles. Du point de vue agronomique, deux raisons sont évoquées pour justifier le développement et l'introduction sur le marché du riz résistant aux herbicides. La première raison est d'améliorer le contrôle de la flore des mauvaises herbes associées à cette culture, spécialement le riz rouge (riz sauvage) et d'autres espèces de riz sauvage (Olofsdotter *et al.* 2000; Gealy et Dilday, 1997). La seconde raison est de fournir un outil alternatif pour la gestion des mauvaises herbes qui ont déjà développé une résistance à des herbicides particuliers, surtout des graminées comme *Echinochloa* spp. (Olofsdotter *et al.* 2000; Wilcut *et al.* 1996). En outre, le riz résistant aux herbicides, permet la substitution de certains herbicides utilisés couramment par d'autres qui portent moins de préjudices à l'environnement (Olofsdotter *et al.* 2000).

Dans plusieurs endroits du monde, l'érosion du sol résultant des pratiques de labour est un problème. En général, les HRC peuvent être favorables à l'environnement en permettant une gestion souple des mauvaises herbes comparées au système conventionnel. Ceci peut permettre aux agriculteurs de pratiquer le labour de conservation c'est à dire le zéro-labour ou le labour réduit, et partant, réduire l'érosion du sol (Duke, 2001).

LES RISQUES

Pour les CRHs, les risques peuvent être considérés comme des estimations qualitatives qui combinent la probabilité et la sévérité des effets néfastes immédiats et tardifs sur la santé humaine, l'environnement et l'économie à l'échelle de l'agriculteur. La probabilité et la sévérité de chaque effet indésirable associé avec le CRHs dépendent de la culture, des caractéristiques du gène de résistance, la flore locale des mauvaises herbes, des conditions climatiques et des pratiques de gestion du champ, et peuvent être seulement estimées au cas par cas (Madsen *et al.* 2002b).

Dans les cultures résistantes au glyphosate, le contrôle optimal des mauvaises herbes demande des applications séquentielles de glyphosate, et la programmation par rapport à la levée des mauvaises herbes est importante. (Swanton *et al.* 2000).

Quand le glyphosate est pulvérisé, 2-3 fois annuellement à des doses élevées il impose une forte pression de sélection sur la flore des mauvaises herbes. Dans 5-8 ans, il peut causer des changements dans la composition des mauvaises herbes par l'apparition d'espèces qui naturellement tolèrent le glyphosate (Benbrook, 2001; Shaner, 2000) et d'autres herbicides peuvent être nécessaires pour contrôler ces mauvaises herbes (Shaner, 2000). Payne et Oliver

(2000) ont suggéré l'utilisation herbicides conventionnels de post-levée dans le programme de contrôle des mauvaises herbes dans lequel le soja est résistant au glyphosate pour aider à contrôler des espèces tolérantes au glyphosate comme *Sesbania exaltata* (Raf.) cory, *Ipomea* spp. ou *Amaranthus rudis* Sauer. Par ailleurs, il sera difficile de contrôler les repousses de la culture tolérante aux glyphosate les années suivantes. Si les agriculteurs cultivent des variétés de maïs et de soja résistantes au glyphosate dans une rotation soja-maïs, alors le glyphosate ne peut pas contrôler les repousses de maïs, ce qui peut être un sérieux problème de mauvaises herbes dans le soja (Shaner, 2000).

Le flux de gène entre cultures ou vers des espèces apparentées est une autre voie pour le développement de populations résistantes de mauvaises herbes dans les champs. Une fois que le gène résistant est présent dans les repousses ou dans des mauvaises herbes apparentées, alors, il est espéré que les mêmes pratiques de contrôle des mauvaises herbes (pulvérisation continue avec des herbicides ayant le même mode d'action), qui causent l'apparition de la résistance aux herbicides dans les biotypes de mauvaises herbes naturellement tolérants/résistants conduiront à une reconstitution rapide des populations des mauvaises herbes et des repousses résistantes aux herbicides.

L'augmentation de l'utilisation des herbicides est considérée comme un risque dans certaines parties du monde bien que les effets sur la santé humaine ou l'environnement sont peu souvent spécifiés en détails, mais les effets dérivant de l'utilisation d'herbicides comme la pollution de la nappe phréatique et les résidus de pesticides dans les légumes par exemple, ont suscité des inquiétudes au niveau de la population. Il semble exister deux raisons pour lesquelles l'utilisation des herbicides dans les CRHs peut augmenter. Une raison est que des niveaux élevés de tolérance des cultures peuvent inciter les agriculteurs à augmenter les doses pour atteindre un niveau de contrôle amélioré des mauvaises herbes sans léser les cultures (Figure 2). La seconde raison réside dans les problèmes de tolérance/résistance des mauvaises herbes et des repousses, qui obligent les agriculteurs à augmenter les doses ou à mélanger des herbicides de différents modes d'action pour maintenir un niveau acceptable de contrôle des mauvaises herbes.

La biodiversité à l'intérieur du champ peut être influencée si l'herbicide auquel le HRC est résistant est utilisé à une plus forte dose d'efficacité que celui qui est utilisé jusqu'à présent dans le but d'atteindre une amélioration du contrôle des mauvaises herbes. En outre, les mauvaises herbes répondent différemment à différents herbicides ou à d'autres mesures de contrôle des mauvaises herbes et les changements dans les espèces dominantes sont très probables. Si la culture d'une HCR a lieu au centre de l'origine génétique, alors les changements dans la diversité des espèces indigènes et les risques de diminution de la diversité génétique de ces espèces constitue un danger (FAO, 2001). Il est cependant très peu probable que les cultures résistantes aux herbicides causeront des érosions génétiques des espèces sauvages en dehors des terres cultivées car la caractéristique est associée à l'utilisation d'herbicides qui ne sont pas appliqués aux espèces sauvages, et un trait de résistance à un herbicide ne confère pas un avantage sélectif à moins que l'herbicide soit utilisé (Poulsen, 1995; Madsen *et al.* 1998). Ainsi, il y a un faible risque d'érosion de la diversité génétique des espèces sauvages poussant dans les milieux naturels.

Malgré ces inquiétudes, certaines utilisations des cultures génétiquement modifiées, par exemple la betterave sucrière résistante aux herbicides, paraissent être sans danger pour ce qui concerne les risques écologiques, lorsque ceux ci sont jugées par les normes scientifiques ordinaires (Madsen et Sandoe, 2001).

Finalement, l'accent doit être mis sur le fait que l'évaluation des risques est seulement une des étapes conduisant à l'approbation finale d'une HCR, qui implique une décision politique. Premièrement, 'un niveau acceptable' de risque n'est pas un terme objectif, et deuxièmement,

l'évaluation des risques des CRHs est associée à un haut degré d'incertitude au regard de l'ampleur et de la probabilité par lesquelles les dangers potentiels associés aux CRHs peuvent apparaître (Madsen *et al.* 2002b).

QUESTIONS CRUCIALES A ABORDER EN EVALUANT LES RISQUES DES CULTURES RESISTANTES AUX HERBICIDES

La première étape est de déterminer quels sont les effets indésirables importants dans un scénario donné. Dans une publication récente, nous avions proposé l'utilisation de clés de décision pour l'identification des dangers/effets indésirables. Ces clés sont mises au point pour évaluer la probabilité qu'un nouveau type de mauvaises herbes soit produite par un flux de gènes entre la culture transgénique et les plantes apparentées; la probabilité que les repousses de la culture transgénique deviennent un problème sur des terres arables ou sur des aires sauvages et la probabilité d'un développement de mauvaises herbes résistantes aux herbicides (FAO, 2001).

LE FLUX DE GENE

Le transfert de gènes d'une population à une autre peut conduire à des effets indésirables pour la gestion des mauvaises herbes et de l'environnement. Le flux de gènes peut permettre aux gènes résistants de se déplacer entre les variétés résistantes aux herbicides et celles qui ne le sont pas et par conséquent polluer une culture considérée comme non transgénique. Or, les gènes de résistance aux herbicides peuvent être empilés pendant des années de pollinisation croisées des CRHs, ce qui peut conduire à des problèmes pour l'agriculteur dans le contrôle des repousses dans le champ. Des repousses de colza dotées de résistance multiples –aux herbicides ont été observées au Canada où le colza pourvu de résistance à différents herbicides était cultivé dans les champs environnants (Hall *et al.* 2000). Le flux de gènes entre des espèces apparentées par exemple la culture et certaines mauvaises herbes dans le champ peuvent de plus conduire au développement de mauvaises herbes résistantes aux herbicides.

Si le flux de gène est un processus important à considérer pour la HRC particulièrement, alors l'étape suivante est souvent de quantifier le niveau du flux de gène à l'intérieur et entre les espèces dans le temps et dans l'espace. Sur les 10-15 années passées, il y a eu un certain nombre d'études sur ce sujet, plusieurs d'entre elles se focalisant sur l'hybridation à l'intérieur et entre les cultures et les espèces sauvages apparentées (voir tableau 1 à la fin du chapitre, de Madsen et Jensen, 1998). D'autres études avaient pour but de déterminer la distance du flux de gène (Figure 1), et certaines ont évalué l'aptitude des hybrides à survivre et à produire des semences sur un nombre de générations; par exemple, Hauser *et al.* (1998) ont montré que la production de biomasse et de semences paraît être réduite dans la seconde génération d'hybrides (F_2 ou BC_1) entre le colza et *B. rapa* L.

APTITUDE COMPETITIVE

Les expérimentations sur la compétition ont montré que les biotypes résistants aux herbicides aussi bien des cultures que des mauvaises herbes peuvent avoir les mêmes aptitudes à la compétition que les biotypes non résistants quand ils ne sont pas pulvérisés avec l'herbicide auquel ils sont résistants (Jensen, 1993; Poulsen, 1995; Fredshavn *et al.* 1995; Madsen *et al.* 1998). Il est par conséquent improbable que l'aptitude à la survie soit accrue par la simple présence du gène de résistance aux herbicides. Une réduction de l'aptitude à la survie a cependant été observée, par exemple la variété de colza OAC Triton résistante à la triazine donne un rendement significativement plus bas que les variétés non résistantes. Quand le biotype de mauvaises herbes résistantes aux herbicides est pulvérisé avec de l'herbicide, non seulement il n'est pas endommagé par la pulvérisation, mais il est en plus libéré de la

compétition avec toutes les mauvaises herbes non résistantes et les repousses, qui périssent. Ceci est à l'avantage du biotype résistant aux herbicides qui rapidement développe une biomasse végétative dans le champ et produit de grandes quantités de semences ou de propagules qui entrent dans la banque de semences du sol. Il y a plusieurs schémas expérimentaux disponibles pour évaluer l'aptitude à la compétition sur une campagne agricole. Cependant, dans l'expérimentation, il est compliqué d'évaluer les effets à long terme sur la dynamique des populations à partir de la modification d'une aptitude à la compétition.

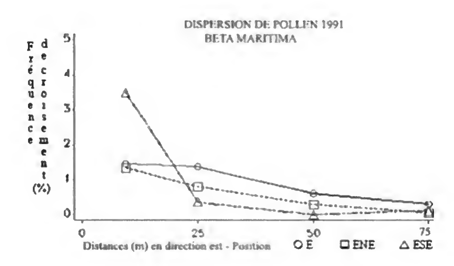


Figure 1. de *Beta vulgaris* var. *conditiva* à - fréquence de croisement (pourcent) en fonction de la distance à *B. vulgaris* var. *conditiva.*
E = Est, ENE = est-nord est, ESE = est- sud est (Source: Madsen, 1994)

LES COURBES DE DOSE-REPONSE

La relation dose-réponse pour une combinaison particulière d'herbicide et des espèces de plantes sous un stade spécifique de croissance et de conditions climatiques peut être décrite comme il est montré à la figure 2. La dose correspondant à un niveau d'éfficacité prédéterminé de 90 % (ED_{90}) peut être utilisée comme mesure de sensibilité des mauvaises herbes et la dose provoquant temporairement 10% de baisse de rendement (ED_{10}) au moment de l'observation et de la prise de note peut être utilisée pour classer les cultures selon leur tolérance à l'herbicide. Il est à noter que les doses sont à une échelle logarithmique. Les courbes de dose - réponse peuvent être utilisées pour déterminer la tolérance de la culture par rapport au niveau de contrôle des mauvaises herbes. Cette procédure est souvent utilisée dans le développement de nouveaux herbicides ou de cultures résistantes aux herbicides. La figure 2.A montre un herbicide sélectif intrinsèque, l'indice de sélectivité ED_{90}/ED_{10}, est supérieur à 1,0, préférentiellement, il devrait être autour de 3,0; la figure 2 B illustre un herbicide non sélectif où le ED_{10} est loin à gauche du niveau de contrôle souhaité des mauvaises herbes; et la figure 2.C montre ce qui arrive quand la culture dans la figure 2.B est rendue tolérante à un herbicide qui autrement est non sélectif. Le ED_{10} pour la culture est déplacé loin à droite de ED_{90} pour les mauvaises herbes.

devenir dominantes et lesquelles peuvent périr en cultivant une HCR nouvellement mise au point et en le pulvérisant avec l'herbicide y associé. Nous pouvons ainsi avoir une première indication brute du changement dans la flore des mauvaises herbes. Cependant, une extrapolation sans un regard critique à partir des courbes de dose-réponse dérivées des expérimentations avec des monocultures de mauvaises herbes sans appréciation des habitudes de croissance des mauvaises herbes par rapport à la culture peut, sous certaines conditions, induire en erreur (Madsen *et al.* 2000). Pour cela, les expérimentations devraient être basées sur des mélanges réalistes de cultures et de mauvaises herbes de préférence dans le champ car, la couverture de la plante peut affecter le dépôt de gouttelettes sur les mauvaises herbes cibles et les conditions climatiques peuvent avoir une forte influence sur la pénétration et la translocation, selon les herbicides et des espèces de plantes.

MODELES DE SIMULATION

Plusieurs des inquiétudes sur les cultures résistantes aux herbicides peuvent être mieux levées expérimentalement par des essais pluriannuels, mais ces expérimentations sont coûteuses. Par ailleurs, ces cultures ont été déjà cultivées sur de larges superficies, ce qui signifie que des stratégies de gestions pour prévenir/retarder les problèmes doivent être rapidement développées pour être effectifs. Des combinaisons de simulations avec des expérimentations sélectionnées à moyen et à long terme peuvent fournir une meilleure compréhension des stratégies disponibles de gestion des mauvaises herbes qui peuvent prévenir ou retarder la sélection des mauvaises herbes résistantes aux herbicides. En plus, le développement d'un système de modèle peut révéler là où l'information pertinente manque ou est rare. La simulation peut donc être capable d'anticiper les problèmes avec l'utilisation inconsidérée d'herbicides tel que le développement de mauvaises herbes et de repousses résistantes, et/ou les changements majeurs dans la flore des mauvaises herbes. Bien sûr, les pré-requis pour le modèle doivent être clairement énoncés pour aboutir à une 'appréciation saine' des prédictions.

Madsen *et al.* (2002) ont développé un modèle de simulation de croissance des variétés de riz résistantes aux herbicides dans un système de production pluvial en Amérique Centrale pour mener des investigations sur la question suivante: y a t-il un risque d'augmentation des problèmes de mauvaises herbes qui provienne des flux de gènes et des repousses de riz? La simulation avec du riz résistant au glufosinate a permis de faire une prédiction des effets potentiels à long terme et permis de tester différents scénarios y compris des pratiques différentes de gestion des mauvaises herbes, les niveaux d'hybridation entre le riz commercial résistant aux herbicides cultivé et le riz sauvage mauvaise herbe, et le taux de prédation des semences. Du fait que les risques pourraient devenir manifestes seulement après une production du riz résistant aux herbicides sur le long terme, les simulations ont été faites pour une période de dix ans. Dans un système de production basé sur le riz résistant au glufosinate pour le contrôle des mauvaises herbes, le modèle a prédit que la résistance au glufosinate apparaîtrait après 3-8 ans de monoculture. L'augmentation du taux d'hybridation de 1-5 pour cent a diminué le temps d'apparition de résistance à 1-3 ans. L'augmentation du taux annuel de prédation des graines du riz sauvage à la surface du sol a retardé le développement de la résistance. Le labour en tant que tactique de contrôle des mauvaises herbes a aussi retardé l'apparition de la résistance comparativement à une situation de sans labour. Il faut, cependant, mettre l'accent sur le fait que le modèle était une première tentative de stimulation d'un système de production avec du riz transgénique résistant aux herbicides et que plusieurs de ces paramètres étaient très peu fiables. En outre, le modèle présenté n'avait pas été validé par des données de terrain, ce qui est un pré-requis pour faire des prédictions fiables concernant les conséquences à long terme de la culture du riz résistant aux herbicides.

RISQUES SOCIO-ECONOMIQUES

Si nous appliquons une interprétation plus large des risques, une argumentation familière attire l'attention sur la position dominante du marché des corporations agrochimiques multinationales. Ces compagnies ont acheté plusieurs compagnies de création variétale dans le but de lier la production de semences à la production de substances agrochimiques. Trois des cinq plus grandes compagnies agrochimiques étaient aussi parmi les cinq plus grandes compagnies de production de semences en 1997 (EU, 2000), et ce monopole peut conduire à la perte des variétés traditionnelles et des méthodes de gestion des fermes appliquées très longtemps. Si ceci devait arriver alors, malgré les avantages évidents des nouvelles cultures GM, l'approvisionnement en nourriture pourrait devenir vulnérable à de petits changements dans le comportement (par exemple la résistance) des organismes nuisibles comme les pathogènes, les insectes et les mauvaises herbes (Madsen *et al.* 2002a). Les gènes de résistance aux herbicides peuvent cependant être transférés à différentes variétés; par exemple en 2000, 1100 variétés de soja sur 3000 étaient résistantes au glyphosate (Anderson, 2001).

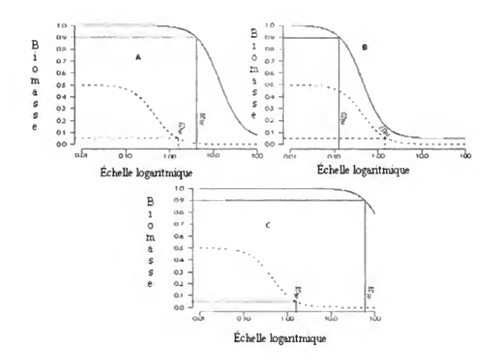


Figure 2. Courbes de Dose-réponse :

A. Herbicide sélectif inhérent qui contrôle les mauvaises herbes sans léser la culture (forte indice de sélectivité ED_{90}/ED_{10}>>1.0)

B. Herbicide non sélectif, aussi les mauvaises herbes que la culture sont susceptibles.

C. La culture en B a été rendue tolérante à l'herbicide donnant un très fort indice de sélectivité.

En adoptant les cultures GM, les agriculteurs rencontrent aussi un certain nombre de contraintes à savoir: l'illégalité de la conservation des semences, le prix des semences ou les frais d'agrément pour la technologie sont élevés, seuls quelques fournisseurs approvisionnent

En adoptant les cultures GM, les agriculteurs rencontrent aussi un certain nombre de contraintes à savoir: l'illégalité de la conservation des semences, le prix des semences ou les frais d'agrément pour la technologie sont élevés, seuls quelques fournisseurs approvisionnent en intrants pour la production (EU, 2000). Par ailleurs, si la culture résistante aux herbicides se croise facilement avec des cultures adjacentes non transgéniques, il se pose alors des questions de droit de propriété par rapport à des plantes qui deviendraient accidentellement résistantes et la question des seuils critiques de semences de plantes transgéniques dans les récoltées de cultures non transgéniques. En plus, les inquiétudes du public sur les nourritures GM peuvent conduire à des demandes de ségrégation des cultures GM des cultures non GM, et l'introduction de garanties et de traçabilité en rapport avec les exportations et/ou la consommation domestique. De pareilles mesures augmentent les coûts. Elles peuvent ainsi conduire à des différences de prix entre les cultures GM et les cultures non GM, et cette différenciation peut conduire à la production de cultures sous contrat. La préservation de l'identité d'une culture représente approximativement un coût de 6-17 % du prix bord-champ (EU, 2000).

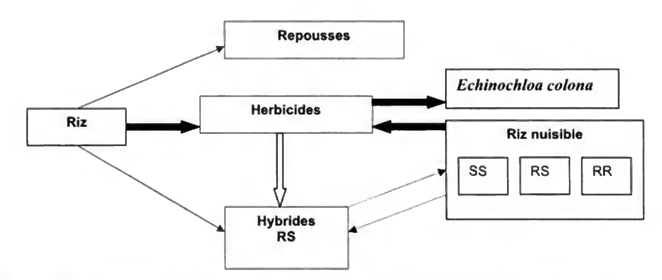


Figure 3. Composantes d'un modèle simulant un système de culture avec du riz résistant aux herbicides, du riz nuisible et *Echinochloa colona* (L.) Link (Madsen *et al.* 2002b)

CONCLUSIONS

Les CRHs ont un fort potentiel dans la simplification de la gestion des mauvaises herbes. Manipulés judicieusement, ces cultures peuvent être bénéfiques pour l'environnement en permettant les systèmes sans labour, réduisant ainsi l'érosion ou en permettant des contrôles tardifs de mauvaises herbes, ce qui peut accroître la biodiversité dans le champ. Cependant, l'accent doit être mis sur le fait que les risques émanant des CRHs devraient être soigneusement évalués avant l'introduction des CRHs dans un système de culture, spécialement lorsque la CRH possède des caractères de mauvaises herbes ou lorsque la CRH peut se croiser avec de mauvaises herbes apparentées. Si c'est le cas, et la HRC est cultivée commercialement alors des précautions doivent être prises à l'instar des stratégies de gestion adoptées pour prévenir le développement de mauvaises herbes naturellement résistantes. De plus, des précautions doivent en particulier être prises avant la mise sur le marché dans la région d'origine génétique de l'espèce.

BIBLIOGRAPHIE

Anderson, T. 2001. *Biotech soybean seed helps growers produce safe and profitable crops.* American Soybean Association. (available at http://www.monsanto.co.uk/news/ukshowlib.phtml?uid=5063).

Benbrook C.M. 2001. Trouble times amid commercial success for Roundup Ready soybeans. *AgBioTech InfoNet technical paper number* 4. May 3, 2001, 6 pp.

Carpenter, J.E. & Gianessi, L.P. 2001. *Agricultural biotechnology: Updated benefit estimates.* Report from the National Center for Food and Agricultural Policy. Washington DC, 46 pp.

Duke, S.O. 2001. Herbicide-resistant crops. *In* Pimentel, D., ed. *Encyclopedia of Pest Management.* Marcel Dekker, Inc., New York (in press).

EU. 2000. *Economic impacts of genetically modified crops on the agri-food sector – A synthesis.* Working document Directorate-General for Agriculture (available at http: //europa.eu.int/comm/agriculture/res/index_en.htm). 43 pp.

FAO. 2001. *Draft of guidelines for assessment of ecological hazards of herbicide- and insect-resistant crops.* Plante Protection Division, Rome. (In collaboration with Kathrine H. Madsen, Valverde, Bernal E. & Streibig, Jens C., of the Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark). 18 pp.

Fredshavn, J.R., Poulsen, G.S., Huybrechts, I. & Rudelsheim, P. 1995. Competitiveness of transgenic oilseed rape. *Transgenic Res.* 4: 142-8.

Gealy, D.R & Dilday, R.H. 1997. Biology of red rice (*Oryza sativa* L.) accessions and their susceptibility to glufosinate and other herbicides. *Weed Sci. Soc. Am. Abstr.* 37: 34.

Hall, J.C., Donnelly-Vanderloo, M.J. & Hume, D.J. 1996. Triazine-resistant crops: The agronomic impact and physiological consequences of chloroplast mutation. *In* Duke, S.O. ed., *Herbicide-resistant crops. Agricultural, Environmental, Economic, Regulatory and technical aspects.* USA, CRC Press. pp. 107-126.

Hall, L., Topinak, K., Huffman, J. & Davis, L. (2000) Pollen flow between herbicide-resistant *Brassica napus* is the cause of multiple-resistant *B. napus* volunteers. *Weed Sci.* 48, 688-694.

Hauser, T.P., Jørgensen, R.B. & Østergård, H. 1998. Fitness of backcross and F_2 hybrids between weedy *Brassica rapa* and oilseed rape (*B. napus*). *Heredity* 81: 436-443.

Heimlich, R.E., Fernandez-Cornejo, J.F., McBride, W., Klotz-Ingram, C., Jans, S. & Brooks, N. 2000. Adoption of genetically engineered seed in U.S. agriculture. In *Proc. of 6th Intl. Symposium on the Biosafety of GMOs.* eds. Fairbairn, C., Scoles, G. & McHughen, A. Saskatoon, Canada. pp. 56-63.

James, C. 2001. Global GM Crop Area continues to grow and exceeds 50 million hectares for first time in 2001. Intl. Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications. http: //www.isaaa.org/press percent20release/Global percent20Area_Jan2002.htm.

Jensen, J.E. 1993. Fitness of herbicide-resistant weed biotypes described by competition models. In *Proc. of the 8th EWRS Symposium Quantitative approaches in weed and herbicide Res. and their practical application,* Braunschweig. 25-32.

Madsen, K.H. 1994. *Weed management and impact on ecology of growing glyphosate tolerant sugarbeets* (*Beta vulgaris* L). Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark. (Ph.D. thesis)

Madsen, K.H., Poulsen, G.S., Fredshavn, J.R., Jensen, J.E., Steen, P. & Streibig, J.C. 1998. A method to study competitive ability of hybrids between seabeet (*Beta vulgaris* ssp. *maritima*) and transgenic glyphosate tolerant sugarbeet (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*). *Acta Agriculturæ Scandinavica, Section B, Soil and Plante Science* 48: 170-74.

Madsen, K.H. & Jensen, J.E. 1998. *Meeting and training on risk analysis of HRCs and exotic plantes.* Course material for the UN Food and Agricultural Organization (FAO) in Piracicaba, Brazil 19-22 May 1998.

Madsen, K.H. & Streibig, J.C. 2000. Simulating weed management in glyphosate-tolerant crops: Greenhouse and field studies. *Pesticide Management Science* 56: 340-344.

Madsen, K.H. & Sandøe, P. 2001. Herbicide resistant sugar beets - What is the problem? J. of Agricultural and Environmental Ethics 14 (2): 161-168.

Madsen, K.H., Sandøe, P. & Lassen, J. 2002a. Genetically modified crops: A US farmer's versus an EU citizen's point of view. *Acta Agriculturae Scandinavica* (in press).

Madsen, K.H., Valverde, B.E. & Jensen, J.E. 2002b. Risk assessment of herbicide resistant crops: A Latin American perspective using rice (Oryza sativa) as a model. Weed Tech. 16 (1), 215-223.

Olofdotter, M., Valverde, B.E. & Madsen, K.H. 2000. Herbicide resistant rice (Oryza sativa L.) in a global perspective: Implications for weed management. Annals of Applied Biology 137, 279-295.

Payne, S.A. & Oliver, L.R. 2000. Weed control programs in drilled glyphosate-resistant soybean. *Weed Tech.* 14: 413-422.

Poulsen, G.S. 1995. *Weediness of transgenic oilseed rape – Evaluation methods.* The Royal Veterinary and Agricultural University, Dept. of Agric. Sciences (Weed Science), Denmark. (Ph.D. thesis)

Shaner, D.L. 2000. The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management. *Pest Management Science* 56: 320-326.

Swanton, C.J., SRHestha, A., Chandler, K. & Deen, W. 2000. An economic assessment of weed control strategies in no-till glyphosate-resistant soybean (Glycine max). *Weed Tech.* 14: 755-763.

Wilcut, J.W., Coble, H.D., York, A.C & Monks, D.W. 1996. The niche for herbicide-resistant crops in U.S. agriculture. *In* Duke, S.O., ed., *Herbicide-resistant crops, agricultural, environmental, economic, regulatory, and technical aspects.* CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, USA. pp. 213-230.

Tableau 1

Allogamie et flux de gènes à l'intérieur et entre différentes cultures et plantes apparentées. La fréquence d'allogamie est entre plantes très proches. La distance d'isolement utilisée dans la création variétale. La Exp.det. distance (distance expérimentalement déterminée) est la distance maximale à laquelle le flux de gènes a été trouvé. Le flux de gènes est mesuré comme potentiel (P) ou actuel (A) flux de gène. F2/BC (seconde génération / back cross) est si oui ou non les hybrides peuvent produire des semences (source : Madsen & Jensen 1998, d'après des données de plusieurs sources de littérature).

Donneur de pollen	Espèces receveurs de pollen	fréquence de croisement extérieur (pourcent)	vecteur	distance d'isolement (m)	Exp det.distance (m)	fréquence à la distance maximale (porcent)	flux de gènes	F_2/BC prod.[1]	Source de littérature
Beta vulgaris	*Beta vulgaris*	faible – 100	vent	1000-1200	800	6	P	+	Jensen & Boegh, 1942 Madsen 1994
"	*B. maritima*	fort	vent		75	0.06-0.31	A	+	"
"	*B. Macrocarpa*		vent		0.5	1.09	A	+	"
"	*B. atriplicifolia*	fort fort	vent		9.4	2.84	A	+	"
Brassica napus	*Brassica napus*	22-36	Abeilles (vent)	200	200	0.008-0.017	P	+	Leckie et al.,1993 Poulsen & Jensen, 1995
"	*B. rapa*	13 (9-93)	abeilles	500					Données non publiées Jorgensen Andersen, 1994 Scheffer & Dale, 1994
"	*B. Juncea*	certains	abeilles	800					Scheffer & Dale, 1994
"	*B. oleracea*	certains	abeilles	800					
"	*B. nigra*	certains	abeilles	800					
"	*Raphanus raphanist*	certains	abeilles	500					
"	*Dilpotaxis muralis*	faible	abeilles	500					
"	*Sinapis alba*	faible	abeilles						
"	*S.arvensis*	faible	abeilles						
Solanum tubero	*S.tuberoum*	faible	abeilles		4.5	0.05	A	+	HØjland & Poulser 1994
"	*S. nigrum*	minimal	abeilles					-	"
Pisum sativum	*P.sativum*	minimal	insectes	1				+	Hƒjland & Poulsen 1994
Vicia faba	*V.faba*	30-40	abeilles	400				+	Metz *et al., 1994*
Medicago sativ	*M. sativa*	76	abeilles		75	7.2	A	+	Hƒjland & Poulsen 1994B/Knapp &

Donneur de pollen	Espèces receveurs de pollen	fréquence de croisement extérieur (pourcent)	vecteur	distance d'isolement (m)	Exp det.distance (m)	fréquence à la distance maximale (porcent)	flux de gènes	F_2/BC prod.[1]	Source de littérature
									teuber, 1993 H ƒjland & Poulsen 1994B
"	*M. falcata*	fort	abeilles					+	
Hordeum vulga	*H. vulgare*	0.5-5	vent					+	Pedersen &H ƒjland, 1994
Triticum aestivi	*T. aestivum*	< 3	vent					+	OECD, 1993
Secale cereale	*S. cereale*	55-100	vent		700	10	P	+	Polanco *et al.*, 1994/ Jensen &B ƒegh, 1942
Zea maize	*Z. maize*	95	vent	400 pas de DI				+	OECD, 1993/ Gill & Vear, 1980
Cucurbita pepo	*C. texana*	élevé	abeilles	400	1300	0	A	?	Dekker, 1988
Oryza sativa	*O. sativa* (riz rouge)	1-52						+	Langevin *et al.*, 1990
Sorghum bicolo	S. halepense (Johns	10-15	vent	200-400	croisements n	11	A	+	Arriola & Ellstrand. 1997
Solanum tuberosum	*S. tuberosum*	faible	abeilles		4.5	0.05	A	+	Resvisé par H ƒjland & Poulsen, 1994
"	*S. nigrum*	mnimal	abeilles					-	Revu par H ƒjland & Poulsen, 1994 Connor & Dale, 1996
"	*S. tuberosum*	faible	abeilles	20 (suggéré)	10	0.02	A	?	
Helianthus annus	*H. annus*	27	insectes	88	1000	2	A	?	Arrias & Rieseberg 1994
Zea maiys	*Z. mexicana*	95	vent	180-750			A	+	Wilkes, 1977
Lupinus albus	*L. angustifolius*	8.4	abeilles	200	37.5	0.04	A	?	Faluyi & Williams, 1981
Phaseolus vulgarus	*P. acutifolius*	faible		3-100	serre		A	(+)	Pratt & Gordon, 1994

+ indique que la génération F_2/BC peut être produite, mais l'expérience n'a pas testé ceci.

Tendances actuelles de gestion des mauvaises herbes

R. Labrada

INTRODUCTION

La Gestion des Mauvaises herbes pour les Pays en Développement a été publiée en 1994, et depuis ce temps, des progrès dans le domaine de la gestion des mauvaises ont été accomplis principalement à travers l'application de nouvelles approches et méthodes, plutôt que par l'introduction de nouveaux herbicides.

Les mauvaises herbes représentent toujours une contrainte majeure à la production agricole dans le monde. Les pratiques agricoles ont démontré que la même philosophie de gestion intégrée utilisée contre les insectes doit être aussi adoptée pour le contrôle des mauvaises herbes. A cause des nombreux et sérieux problèmes de mauvaises herbes dans toutes les régions du monde, on ne peut plus faire confiance en une seule méthode.

Qui plus est, l'agriculture a promu de nouvelles méthodes, qui aussi, directement ou indirectement affectent le contrôle des mauvaises herbes. Ces méthodes sont originales *en soi* et demandent une nouvelle approche pour le contrôle des mauvaises herbes. Par exemple, l'agriculture organique ne permet pas l'utilisation d'herbicides chimiques, ainsi, les méthodes culturales et la lutte biologique sont les seuls moyens qui restent pour venir à bout des mauvaises herbes.

Dans ce chapitre, l'auteur aimerait donner un aperçu sur la situation actuelle de la gestion des mauvaises herbes en général, en identifiant les tendances majeures et les problèmes qui restent à résoudre.

LES MAUVAISES HERBES A PROBLEMES DANS DIFFERENTES CULTURES

Plusieurs espèces de mauvaises herbes sont toujours difficiles à contrôler. Des cultures comme le riz, le blé, le maïs, le sorgho, les légumes, le tournesol, et plusieurs autres sont sérieusement et avec persistance affectées par un ou plusieurs espèces de mauvaises herbes. Certains des problèmes existant dans ces cultures proviennent de l'incidence des mauvaises herbes résistantes aux herbicides. Un résumé de la situation dans des cultures sélectionnées tels que le riz et le blé est fait ci- dessous.

Le Riz

Le riz est l'aliment de base majeur dans les pays en développement et sa production est essentielle pour beaucoup de pays économiquement pauvres. Pour certains d'entre eux, le contrôle chimique des mauvaises herbes est devenu une pratique normale où les herbicides comme le propanil, le thiobencarb, le butachlor, l'oxadiazon, parmi tant d'autres sont couramment utilisés en application de pré ou post émergence. Bien que ces traitements aient augmenté la productivité des agriculteurs, ils ont aussi provoqué la prolifération de certaines espèces difficiles à contrôler, pour lesquelles les substances chimiques ne paraissent pas être une solution à long terme.

Le problème le plus significatif de mauvaises herbes dans le riz se trouve être dans le complexe *Echinochloa* et inclut plusieurs espèces annuelles et pérennes, la plus importante étant *Echinochloa crus-galli,* très répandue presque partout, et *E. colona* dans les pays à climat chaud. En plus, ces espèces, ont développé une résistance aux herbicides les plus communément utilisés (propanil, butachlor, et différents inhibiteurs ALS et ACCase). A ce

stade, il y a un besoin pour mettre en œuvre différentes méthodes de contrôle pour réduire l'incidence de ces espèces. Les méthodes proposées par la « Réunion Technique de la FAO sur la Gestion de *Echinochloa* (Beijing, 2000) sont les suivantes :

1. Des mesures préventives tels que le renforcement des lois sur la quarantaine et les réglementations, et l'hygiène au champ peuvent aider à arrêter la dispersion des semences de *Echinochloa* et des propagules des sources d'infestation vers les régions qui ne sont pas sous menace.
2. Puisque l'eau d'irrigation et les machines agricoles sont deux sources primaires d'infestation de *Echinochloa*, des mesures doivent être prises pour éduquer les agriculteurs sur l'importance de garder les machines indemnes de semences d'*Echinochloa* et de propagules.
3. Une trop forte confiance aux herbicides comme le propanil, le fenoxaprop-ethyl et d'autres pour le contrôle d'*Echinochloa,* peut conduire à l'apparition de biotypes résistants aux herbicides.
4. La rotation culturale est la méthode clé pour diminuer la banque de semences d' *Echinochloa.*
5. Un suivi des populations d'*Echinochloa* résistantes aux herbicides doit être encouragé parmi les chercheurs et les spécialistes de la vulgarisation qui s'intéressent aux mauvaises herbes pour aider à développer des bases de données sur de telles populations.

Echinochloa spp. n'est pas la seule mauvaise herbe à problème dans le riz. Le fait est que les superficies à semis direct ont augmenté ces 10 dernières années à cause de la pénurie de la main-d'oeuvre dans plusieurs pays asiatiques. Ceci a aussi conduit à plus d'utilisation d'herbicides dans le riz, et le problème majeur de mauvaises herbes dans ces régions est le riz sauvage nuisible ou riz rouge.

L'atelier mondial organisé par la FAO en 1999, à Varadero au Cuba, a conclu et a recommandé que :

i) C'est seul par une approche intégrée que la réduction de l'infestation de riz nuisible/rouge peut être réalisée de façon efficace.
ii) Les sources principales d'infestation de riz nuisible/rouge sont les semences de riz contaminées par les semences de ce riz nuisible et la banque de semences de riz nuisible/rouge dans le sol. Ainsi, toute mesure de contrôle doit être dirigée vers la réduction de l'infestation à partir de ces sources.
iii) L'expérience dans le contrôle de cette mauvaise herbe, dans d'autres pays qui utilisent des technologies avancées, a montré que même une seule semence de riz nuisible/rouge ne doit être tolérée dans les semences de riz.
iv) La reproduction de semences de pré-base et de base doit être faite dans des zones totalement indemnes d'infestation de riz nuisible/rouge. Les semences certifiées de riz doivent être indemnes de semences du riz nuisible/rouge.
v) Les mesures de contrôle contre le riz rouge nuisible dans les champs sont diverses et leur mise en œuvre dépendra des conditions spécifiques du site. Cependant, toute mesure de contrôle doit être dirigée vers la réduction des banques de semences du riz nuisible/rouge dans les sols sur le moyen ou le long terme.
vi) A ce jour, les mesures de contrôle les plus efficaces ont été celles basées sur la combinaison de la préparation de sol humide pour susciter l'émergence des semences du riz nuisible/rouge, suivi de l'application d'herbicide sur la végétation de la mauvaise herbe et avant le semis du riz, et la gestion de l'eau avant et après le semis.
vii) En conditions de plateau et sous irrigation, il est conseillé de mettre en œuvre chaque fois que c'est possible, le labour minimum ou le sans labour combiné avec l'utilisation d'herbicides non sélectifs. Cette pratique est moins chère et peut être soutenue par les producteurs de riz.

viii) Dans un contexte de gestion intégrée, il est nécessaire de conduire des études régulières sur le comportement des cultivars de riz disponibles en terme de leur aptitude à la compétition avec le riz nuisible/rouge, leur cycle et leur tolérance à la submersion pendant les périodes d'inondation.

De ce fait, comme il a été constaté pour les deux complexes de mauvaises herbes, la solution réside dans une gestion intégrée des mauvaises herbes, où l'utilisation de semences propres, une rotation culturale appropriée et la préparation du sol jouent un rôle important tout comme l'utilisation rationnelle d'herbicides, évitant ainsi les problèmes de résistance aux herbicides.

Le blé

Les problèmes principaux dans les champs de blé sont associés aux problèmes de résistance des mauvaises herbes aux herbicides. Dans ce contexte, une des incidences les plus sérieuses est celle associée à la graminée *Phalaris minor* résistante à l'isoproturon dans le nord de l'Inde. La totalité de la région riz-blé de 10 millions d'hectares est affectée par le biotype résistant de *Phalaris* dans les plaines Indo-Gangétiques. Le problème est plus sérieux sur une superficie de 5 millions d'hectares (Malik, R.K. communication personnelle, 2002).

Pour surmonter ce problème, les spécialistes indiens ont adopté une approche intégrée pour cultiver le blé en rotation avec le riz en semis direct. Il y a déjà plus de 10 000 ha de blé plantés avec le système sans labour en Inde, et cela a rapporté plusieurs bénéfices, telles que l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la prévention de l'érosion du sol et de sa compaction, la réduction des besoins pour l'application d'herbicides, l'augmentation des rendements du blé. Les études sur les essais à long terme sur le sans labour ont montré que le couvert de *Phalaris minor* a décru sur la période de trois ans à cause de l'effet combiné de l'herbicide clodinafop et le sans labour (Consortium Riz-Blé et CIMMYT, 2003).

Le système de culture le plus largement adopté est le système riz/blé, avec une superficie de 13,5 millions ha en Asie du Sud et 10 millions ha en Chine. Alors que les cultures de riz sont de différentes natures (pluviale ou irriguée) et de différentes durées, selon les situations de production, le blé est le plus souvent irrigué. A cause d'une diminution de la productivité totale des facteurs les revenus issus de ces deux céréales sont faibles ou négatifs, surtout dans les zones de forte productivité de l'Inde, de la Chine, ou du Pakistan. Dans le Secteur Est de l'Inde, et une grande partie du Népal et du Bangladesh, la productivité des deux cultures est basse à cause des semis tardifs et l'utilisation de doses d'intrants relativement plus faibles que celles recommandées. L'intensification des systèmes de cultures a conduit à un stress sur les ressources naturelles, incluant les ressources de la terre et de l'eau. La flore des mauvaises herbes est devenue simple, avec une dominance de graminées annuelles aussi bien dans le blé que dans le riz. La dominance de quelques graminées annuelles avec de très fortes populations a conduit à l'utilisation d'herbicides, qui ne sont pas une solution durable à long terme. La résistance aux herbicides a déjà prouvé que les avantages des herbicides ne compensent pas les risques économiques. En plus, les agriculteurs à faibles revenus sont incapables de faire un choix à partir d'un nombre limité d'herbicides qui leur sont accessibles, et souvent, leur utilisation continue peut conduire aussi à la contamination de la chaîne alimentaire. Ainsi, les agriculteurs dans ces pays ont non seulement besoin de technologies qui réduisent leur coût de production, mais aussi de trouver une solution aux problèmes de durabilité relatifs par rapport aux ressources naturelles, aux risques associés aux herbicides et à la protection de l'environnement. Une attention particulière doit être accordée au problème de résistance aux herbicides. *Phalaris minor* a développé une résistance à l'isoproturon, et l'auteur dans ses visites récentes à ces localités a constaté que le clodinafop n'est plus aussi efficace sur plusieurs sites où ce composé a été utilisé durant les 3-4 dernières années. Le pire, c'est qu'il n'y a pas de monitoring de résistance aux herbicides sur place et les agriculteurs manquent de conseil. Il est nécessaire de former les vulgarisateurs et les agriculteurs sur des thèmes relatifs

à la résistance aux herbicides pour leur permettre de détecter les espèces résistantes à temps, et de remplacer l'utilisation d'herbicides par d'autres méthodes de contrôle s'il en existe, en utilisant des modes d'action alternatifs.

***Striga* parasite dans les céréales et *Orobanche* dans diverses cultures dicotylédones.**

La situation dans le contrôle des mauvaises herbes parasites n'a pas significativement changée au cours des dix dernières années. Il y a eu en fait quelques tentatives pour mettre en application une méthode de contrôle basée sur le traitement des semences avec un herbicide et un produit de protection (safener) pour les semences des cultures. Cette méthode est réellement efficace pour le contrôle du *Striga* dans le maïs (Kanampiu et Friessen, 2002). Malheureusement, il existe quelques contraintes à la diffusion de l'utilisation de cette méthode parmi les agriculteurs. D'une part, il y a le besoin d'avoir quelques équipements pour traiter les semences- que les agriculteurs n'ont pas - ajouté au fait que les agriculteurs auront à payer pour le traitement de leurs semences et pour les produits chimiques utilisés. Au Kenya, cette méthode coûte seulement 4 dollars US. Si les agriculteurs sont en mesure de payer, ceci peut constituer une solution. Un autre problème pourrait être la résistance du *Striga* à l'herbicide proposé (imazethapyr) dans le moyen terme. Certains peuvent argumenter que les doses sont très faibles et que la résistance ne devrait pas s'installer, mais l'expérience a montré que si les doses sont importantes dans le développement de résistance, la nature de l'herbicide l'est aussi. Les inhibiteurs ALS et ACCase ont une grande pression de sélection et peuvent provoquer l'apparition de résistance aux herbicides dans quatre à cinq ans. Il est vrai qu'il n'existe pas de méthode parfaite, mais nous devons prendre conscience des problèmes qui peuvent surgir en un temps 'x' dans le souci de les prévenir. Les problèmes de résistance peuvent être rapidement surmontés en agriculture dans les pays développés, mais non dans les pays en développement à cause du manque de ressources.

C'est pour cette raison que le *Striga,* mauvaise herbe parasite doit être géré à travers la mise en œuvre d'une approche intégrée où des mesures de restriction doivent doivent jouer un rôle important dans le contrôle et la réduction de sa banque de semences (Ranson, 1996) pendant que l'on maintient ou accroît la productivité du champ.

Les mesures de restriction peuvent être exécutées à travers l'utilisation de semences et d'outils propres, alors que la banque de semences du *Striga* peut être réduite en évitant la reproduction à partir d'arrachages manuels de ces mauvaise herbes et/ou l'application du 2,4-D dans les cultures pure de céréales, en induisant la germination suicidaire avec des faux hôtes efficaces et en augmentant la mortalité naturelle des semences par l'accroissement de l'activité biologique du sol. La conservation de la productivité du champ est réalisée par l'utilisation de cultivars résistants/tolérants, à travers une utilisation stratégique de cultures non hôtes, en retardant la fixation avec des semences traitées à l'herbicide, et en améliorant la fertilité du sol. Compte tenu des agro-écologies variées et des systèmes de culture où se rencontre le *Striga,* une adaptation locale et une intégration de ces composantes sont nécessaires. Les docteurs Jurgen Kroeschel et Abuelgasim Elzein ont fourni un excellent aperçu du problème des mauvaises herbes parasites dans ce volume, et ont donné des informations intéressantes sur différentes méthodes de contrôle incluant une information détaillée sur le contrôle biologique à travers l'utilisation de la mouche *Phytomyza* et/ou des isolats de *Fusarium oxysporium.*

En prenant en compte les problèmes posés par *Orobanche* spp. dans les pays de l'Afrique du Nord, et du Proche Orient, nous sommes aussi heureux de fournir les résumés suivants des informations issues de l'Atelier Régional organisé par ICARDA-FAO, tenu à Rabat, Maroc, (Avril 2003) sur le statut du contrôle de ces mauvaises herbes parasites. Les principaux points sont :

Algérie: O. crenata est un problème majeur dans la fève, la lentille, le pois chiche et les pois. Les espèces de ce parasite ont un fort polymorphysme interspécifique et un faible polymorphysme intraspécifique. Les mesures principales de contrôle consistent à retarder la plantation des légumes et à utiliser l'herbicide glyphosate en deux applications de post-levée. Quelques essais se poursuivent pour tester l'efficacité des herbicides imidazolinones, comme l'imazapyr et l'imazethapyr. Quelques recherches ont été menées sur la possible utilisation des insectes du genre *Smicronyx* pour le contrôle biologique d'*Orobanche.*

Egypte: la fève est la culture principale affectée par *Orobanche crenata.* Les égyptiens ont développé quatre cultivars résistants. Ils pratiquent le semis tardif seulement dans les aires irriguées, et appliquent le glyphosate à des doses réduites (64 g m.a./ha) en deux applications en certains endroits. La mouche *Phytomiza orobanchia* est présente dans le pays, mais des travaux n'ont pas été conduits pour accroître sa population.

Ethiopie: Trois espèces d'*Orobanche* ont une incidence majeure dans le pays : *O. minor* dans les cultures ornementales et le tournesol, *O. ramosa* et *O. cerna* dans la tomate où ils peuvent causer des pertes de récolte allant jusqu'à 60%. Ces espèces affectent aussi les légumineuses (919 000 ha de 'fève', pois chiche, lentilles et autres). A présent, les spécialistes éthiopiens ont concentré leurs travaux sur l'identification de cultivars résistants et l'utilisation de méthodes culturales, surtout la rotation des cultures.

Iran: Les spécialistes de ce pays ont signalé 36 espèces d'*Orobanche*, la plus importante d'entre elles étant *Orobanche aegyptiaca* qui affecte les lentilles, la luzerne et le pois chiche. D'autres espèces présentes sont *O.nana* dans les amandes (*Prunus amygdalus*), *O. ramosa* dans les cucurbitacées et *O. cernua* dans le tournesol et le tabac. Les recherches sont conduites sur l'utilisation de faux hôtes dans la rotation culturale, l'utilisation de *Fusarium* et/ou de *Phytomiza* pour le contrôle biologique, de même que la rotation culturale avec le riz et l'utilisation de l'inondation.

Maroc: Quatre espèces prédominent: *Orobanche ramosa/ Orobanche aegyptiaca* dans les Solanacées, *Orobanche crenata* dans les légumineuses et *Orobanche foetida* dans le trèfle. La dernière espèce peut aussi se rencontrer en milieu naturel comme parasites de plusieurs espèces sauvages. Le pays a participé à un programme de recherche avec la GTZ, qui apparemment a produit plusieurs publications et des résultats utiles concernant l'utilisation de cultivars de 'fève' résistants, le semis tardif dans les aires irriguées, l'utilisation de glyphosate et quelques démonstrations en champs, et d'autres mesures dans l'utilisation de la mouche *Phytomiza.*

Soudan: Les principales espèces sont *O. crenata et O. ramosa.* La première affecte les légumineuses (fève, pois chiche et lentille) et la dernière se rencontre surtout dans les aires occupées par les Solanacées tels que le piment, la tomate, la pomme de terre, l'aubergine et le tabac. La recherche se concentre principalement sur les cultivars résistants, le semis tardif de la fève, et l'utilisation d'herbicides imidazolinones comme l'imazethapyr (50-76-100 g m.a./ha) incorporé au sol en pré-plantation ou en pré-levée. Les essais avec le glyphosate en post-levée ont été aussi conduits.

Syrie: La tomate est sérieusement affectée par *O. ramosa/O. aegyptiaca* et la méthode principale de contrôle est l'arrachage manuel dans la tomate avec ou sans paillis plastique noir.

Turquie: Il existe quatre espèces parasites d'*Orobanche: O. ramosa/O. aegyptiaca* dans les Solanacées, les légumineuses et les Cucurbitacées, *O. cernua* dans le tournesol et *O. crenata* dans la fève et le pois chiche. La solarisation est largement utilisée de même que les mouches

Phytomiza. Dans certaines zones de tabac et de tournesol, l'imazapyr a été utilisé à une dose réduite (0.1 kg m.a/ha).

Tunisie: Ce pays partage avec le Maroc les mêmes problèmes d'*Orobanche. O. foetida* et *O. crenata* sont les principales espèces qui affectent les *Vicia* et la fève. Le programme de recherche conduit dans le pays est aussi similaire à celui du Maroc. Plusieurs herbicides tels que le glyphosate ou le sulfosate, et les imidazolinones ont été testés. L'association de fève avec le fenugrec semble être bon. La méthode principale de contrôle est l'arrachage manuel.

PROBLEMES DES MAUVAISES HERBES AQUATIQUES ET CONTROLE

Mauvaises herbes flottantes

Les problèmes avec les mauvaises herbes aquatiques, particulièrement avec les espèces flottantes ont énormément augmenté dans beaucoup de pays en développement de l'Asie, de l'Afrique et même de l'Amérique Latine au cours des dix dernières années.

Le problème majeur de mauvaises herbes, et probablement le problème majeur dans le monde est l'introduction et l'invasion de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) dans plusieurs régions du monde. Actuellement, le milieu aquatique africain est fortement infesté par cette mauvaise herbe, incluant le Lac Victoria en Afrique de l'Est, le Congo en Afrique Centrale, le Niger et plusieurs autres rivières en Afrique de l'Ouest. Le Nil continue à être affecté par cette mauvaise herbe. D'énormes quantités de cette plante sont mécaniquement enlevées chaque année du Nil en Egypte.

En Amérique Latine, la plante s'est rapidement disséminée dans plusieurs pays au Mexique, en Amérique Centrale et aux Caraïbes. Bien que quelques ennemis naturels de la plante existent dans ces localités, une forte pollution des eaux dans les barrages et dans les fleuves permet à la jacinthe de proliférer et d'infester totalement les plans d'eau. L'Asie n'échappe pas à ce problème. Plusieurs régions du continent chinois sont sérieusement infestées par la mauvaise herbe pendant que presque tous les plans d'eau au Sri Lanka, en Inde et aux Philippines, en Thaïlande, en Malaisie et au Vietnam présentent des infestations moyennes ou élevées.

D'autres mauvaises herbes flottantes sont la fougère d'eau (*Salvinia molesta*) et la laitue d'eau (*Pistia stratiotes*). Ces plantes se reproduisent rapidement dans des conditions de climat chaud, et peuvent couvrir l'ensemble des plans d'eau d'une région en une courte période. La fougère d'eau a été un problème sérieux dans différents pays, entres autres en Papouasie-Nouvelle Guinée et plus récemment le fleuve Sénégal. La laitue d'eau est trouvée partout en milieu tropical et il se reproduit rapidement dans des eaux hautement polluées.

A cause de ces problèmes, plusieurs programmes nationaux et régionaux sont mis en œuvre pour le contrôle des mauvaises herbes flottantes. Le plus grand a été celui initié en Ouganda avec le support de la FAO pour contrôler la Jacinthe d'eau dans le Lac Victoria. Le projet initial de la FAO en 1991 a conduit à deux autres projets FAO et il est maintenant une composante d'un grand programme de gestion des zones humides du Lac Victoria, incluant trois pays qui sont l'Ouganda, le Kenya et la Tanzanie. De même, d'autres pays comme le Ghana, la Côte d'Ivoire, le Mali, le Niger, le Bénin, le Togo et le Burkina Faso ont conduit des projets nationaux ou régionaux également supporté par la FAO en collaboration avec d'autres institutions comme CSIRO, IIBC et IITA. L'approche recommandée ici a toujours été la gestion intégrée où la composante majeure est le contrôle biologique classique à travers l'introduction d'insectes spécifiques comme les charançons, *Neochetina eichhorniae* et *N. bruchi.* A cette fin, le personnel technique a été formé aux méthodes d'élevage d'insectes et de lâcher, et des unités d'élevages appropriées ont été mis au point.

Bien que le contrôle biologique aide à réduire l'infestation de la jacinthe d'eau, il n'est pas suffisant en plusieurs endroits à cause de l'existence d'une couverture importante de la mauvaise herbe et de plans d'eau fortement pollués. A ce stade, d'autres mesures de contrôle à court terme sont nécessaires et sont à intégrer avec le contrôle biologique. Ceux ci pourraient consister en des arrachages manuels ou mécaniques et une utilisation rationnelle d'herbicides peu toxique. Au Ghana, l'utilisation du glyphosate pour contrôler la jacinthe d'eau dans les zones fortement infestées a été acceptée et approuvée pendant que l'arrachage manuel est actuellement pratiqué en Ouganda. L'enlèvement manuel est très fréquemment utilisé dans les localités proches des centrales électriques comme Sotouba au Mali et les Chutes d'Owen en Ouganda, où une eau complètement propre est une nécessité.

L'expérience avec la jacinthe d'eau a clairement montré que des programmes à long terme sont nécessaires pour réduire substantiellement l'infestation de cette mauvaise herbe. Les simples lâchers d'insectes sur la jacinthe ne résoudront pas le problème. Un programme nécessitera d'être établi pour l'élevage/lâcher des insectes, avec l'implication des communautés locales affectées par la mauvaise herbe. Le monitoring est une autre activité très importante qui nécessitera d'être régulièrement conduit, avec l'objectif d'arriver à des décisions appropriées.

De meilleurs résultats ont été obtenus pour le contrôle de la fougère d'eau et de la laitue d'eau en utilisant les agents biologiques de contrôle comme les charançons, *Neohydronomous affinis* pour le contrôle de la laitue d'eau et *Cyrtobagous salviniae* pour le contrôle de la fougère d'eau. De bons résultats ont été atteints avec les deux insectes pour le contrôle de ces deux espèces dans le fleuve Sénégal (Labrada et Fornasari, 2003). Sur une période de 12-14 mois, un contrôle intense a été obtenu dans les deux cas suite à un lâcher massif d'insectes.

Mauvaises herbes enracinées

Dans certains endroits où la profondeur de l'eau est réduite différentes espèces de *Typha* peuvent devenir un sérieux problème.

Le fleuve Sénégal a connu des couverts importants de laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) et de fougère d'eau (*Salvinia molesta)*, tous deux solutionnés par l'utilisation d'agents biologiques de contrôle, mais il connaît maintenant une infestation accrue de *Typha*. Cette infestation de *Typha* empêche le retrait facile et sans danger de l'eau du fleuve. De tels couverts fournissent des habitats aux serpents pour leur reproduction, et la population locale a bien entendu peur de ce danger.

Malheureusement, il n'existe pas d'agent biologique efficace pour le contrôle de *Typha*, aussi, le contrôle à ce niveau devra se baser sur l'arrachage manuel ou mécanique. Au Mexique et ailleurs, des coupes mécaniques répétées au niveau de la surface de l'eau pendant une période d'un an sont une bonne méthode pour réduire substantiellement le couvert de *Typha* spp. Cette procédure épuise les réserves nutritives de la partie souterraine de la plante, éradiquant ainsi une grande partie du couvert.

La faisabilité de cette méthode dépendra de la capacité des communautés locales à faire face à l'achat de cet équipement et le carburant nécessaire pour l'opération.

Mauvaises herbes submergées

Il existe plusieurs mauvaises herbes submergées qui causent des impacts néfastes à l'utilisation de l'eau. Ces espèces affectent l'écosystème aquatique et la navigation en développant des végétations très denses. Les joncs denses affectent sérieusement la qualité de l'eau, en diminuant l'oxygène et en augmentant les températures au-dessous des joncs. Les végétations créées fournissent un bon habitat pour la reproduction des moustiques. Quelques activités récréatives comme le canotage, ou commerciales comme la pêche sont aussi sérieusement affectées.

Les espèces majeures submergées sont *Elodea spp.*, *Egeria* spp., *Hydrilla verticillata,* et différentes espèces de *Potamogeton, Myriophyllnm spicatnm, Ceratophyllnm demersnm,* et l'algue macrophyte unicellulaire. De fortes infestations de ces plantes apparaissent dans les eaux polluées et pauvres en oxygène.

Il existe plusieurs herbicides recommandés pour le contrôle des mauvaises herbes submergées, parmi lesquels on peut citer le granulé dichlobenil et le Z-propenal souvent connu sous le nom de acrolein, terbutryne et diquat. Ces composés sont appliqués directement à l'eau et sont efficaces dans les eaux statiques. Le diquat n'est pas aussi efficace dans le contrôle de *Potamogeton.* Les meilleurs résultats avec dichlobenil sont obtenus quand les plantes sont au préalable arrachés mécaniquement, et l'herbicide granulé est appliqué immédiatement après l'enlèvement des mauvaises herbes. Une autre bonne option pour le contrôle de *Potamogeton* réside dans l'utilisation de la *Carpe* herbivore (*Ctenopharyngodon idella).*

Aux Etats Unis, l'herbe exotique *Hydrilla verticillata (*originaire de certaines localités d'Asie, d'Afrique et d'Australie) est devenu un sérieux problème dans plusieurs milieux aquatiques de la Californie et de la Floride (Anon. 2003). Trois herbicides sont approuvés ici pour le contrôle de *Hydrilla.* Il s'agit du systémique à action lente fluridone, qui est un composé très coûteux; l'endothal à action rapide et des composés à base de cuivre qui sont utilisés seul ou en mélange avec l'endothal. Le cuivre est aussi efficace dans le contrôle des algues. Aucun de ces herbicides n'affecte les semences, les tubercules et les turions de la mauvaise herbe, et des applications répétées sont nécessaires pour le contrôle de la reprise de croissance de *Hydrilla.* Le contrôle mécanique n'est pas la meilleure méthode parce que la plante se multiplie par fragmentation. La méthode la plus efficace contre *Hydrilla* est l'utilisation de la carpe herbivore stérile triploïde (*Ctenopharyngodon idella*) (Anon, 2003). D'autres agents de contrôle biologique ont été explorés depuis 1981 aux Etats Unis, l'un d'entre eux étant *Bagons affinis* le charançon des tubercules d'*Hydrilla.* L'adulte pond ses oeufs sur du bois en décomposition et autres matières organiques et après éclosion la larve creuse des galeries dans le sédiment jusqu'à rencontrer un tubercule d'*Hydrilla* (Bennett et Buckingham, 1991). L'insecte se nourrit sur les tubercules où il accomplit son cycle, détruisant ainsi finalement le tubercule. La mouche mineuse des feuilles d'*Hydrilla*, *Hydrellia pakistanae* originaire du Pakistan et de l'Inde, a été lâchée au Sud de la Floride en 1987 (Balciunas et Center, 1988). On a découvert qu'elle attaque la plante, mais son impact n'est toujours pas connu. Les résultats des lâchers de cet insecte sont toujours en cours d'évaluation.

Utilisation accrue du contrôle biologique des mauvaises herbes

Un certain nombre de programmes de contrôle biologique dirigés vers différentes mauvaises herbes aquatiques ont été conduits avec succès dans le monde. D'autres espèces terrestres comme *Chromolaena odorata* sont sous contrôle en utilisant l'insecte *Parechetes psendoinsnlata* (Muniappan, 1994) dans Guam. *P. psendoinsnlata*, l'agent biologique de contrôle de *C. odorata* lâché à Fumesua dans la région Ashanti du Ghana en 1991 qui a effectivement contrôlé la mauvaise herbe dans un projet pilote. Le bon établissement de

P. pseudoinsulata a été le résultat de lâchers continus de grandes quantités d'insectes sur *Chromolaena.* L'activité nourricière de l'insecte a réduit les populations de *Chromolaena* d'une moyenne d'environ 85% dans les champs infestés à 32.9% dans les endroits où le contrôle de la mauvaise herbe a été réalisé. Les populations des autres espèces de mauvaises herbes en danger d'instinction ont augmenté de 13.0% à 38.0%, et celles des graminées de 2,0% à 29,1% (Timbilla, 1996). L'introduction de *P. pseudoinsulata* en Indonésie a donné de bons résultats seulement dans le Nord Sumatera alors qu'au Java, il n'a été rapporté aucune réussite de son établissement (Tjitrosemito, 1996).

Un autre bioagent, la mouche téphritide qui forme des galles sur tiges *Procecidochares connexa* a été lâchée en Indonésie pour le contrôle de *C. odorata* pour la première fois près de Marihat dans le nord de Sumatra en janvier 1995. Elle s'est établie rapidement et aisément, et maintenant elle semble avoir un impact sur la mauvaise herbe, spécialement dans les endroits où il apparaît en conjonction avec *P. pseudoinsulata.* Les lâchers en champ étaient faits en utilisant des mouches adultes (Wilson et Widayanto, 1996).

Quelques tentatives sont en cours pour le contrôle de *Striga* (Watson *et al.* 1998). Une équipe de scientifiques financée par le 'International Development Research Centre' a trouvé que le champignon (*Fusarium oxysporum*) dans le sol au Mali peut supprimer la croissance de cette plante parasite. Dans une étude pilote, le champignon était cultivé sur la paille de sorgho et ensuite éparpillé dans les champs des agriculteurs au moment du semis. Les résultats obtenus ont indiqué la suppression de la croissance du *Striga* et une augmentation drastique du rendement du sorgho.

AGRICULTURE ORGANIQUE

Récemment, l'agriculture organique (biologique) a énormément augmenté dans plusieurs régions du monde et cette tendance n'a pas encore cessé. La superficie totale emblavée en agriculture biologique est estimée à environ 8.189.717 ha (tableau 1). L'agriculture biologique devrait être considérée comme un processus dépendant hautement des processus biologiques naturels. Ainsi, son objectif est de stimuler ces processus pour obtenir le maximum de suppression des problèmes d'organismes nuisibles. Evidemment, l'utilisation de pesticides chimiques est contraire au concept et à la pratique de l'agriculture organique, et l'intervention humaine dans le processus doit être faite avec une grande précaution.

La gestion des mauvaises herbes dans l'agriculture organique n'est pas une tâche facile, particulièrement dans les endroits où la main d'oeuvre pour l'arrachage manuel est peu disponible ou trop coûteuse. Cependant, le principe doit être le même que dans tout système de culture conventionnel, c'est à dire la nécessité de prévenir la compétition avec les mauvaises herbes afin d'obtenir une récolte maximale. Ceci implique nécessairement l'élimination des mauvaises herbes sans substances chimiques, mais, ceci doit être fait exactement au bon moment pour éliminer les mauvaises herbes pendant la période critique de compétition. Les systèmes organiques demandent aussi l'utilisation de méthodes préventives avant la culture et l'établissement raisonnable d'une rotation culturale. La préparation faux lits de semences dans le souci de tuer les mauvaises herbes mécaniquement ou manuellement est une très bonne option pour retarder le début de la compétition des mauvaises herbes. L'utilisation de plantes de couverture et d'engrais vert, en plus de l'augmentation de la fertilité du sol peut aider au contrôle de quelques espèces de mauvaises herbes. Les méthodes les plus communément utilisées pour prévenir la compétition des mauvaises herbes dans les cultures organiques sont les fortes densités de semis, les écartements de semis réduits/semis croisé, et les cultures compagnes avec des légumineuses à petites graines. Dans les régions tempérées, le trèfle doux, les médiques et la luzerne sont les cultures compagnes les plus communément utilisées. D'autres séquences de rotation des cultures dans les régions tropicales et sub-

tropicales doivent être mises au point pour garantir une croissance vigoureuse des cultures, avoir peu de problèmes d'organismes nuisibles, incluant les mauvaises herbes.

Tableau 1

Superficies consacrées à l'Agriculture Organique dans le Monde
(Données obtenues de Yussefi Minou et Willer Helga, 2002)

Région	**ha**
Asie	53 936
Afrique	30 401
Océanie	50 500
Europe	3 778 944
Amérique Latine	2 923 936
Amérique du Nord	1 325 000
TOTAL	**8 162 717**

UTILISATION D'HERBICIDES ET RESISTANCE AUX HERBICIDES

Pour diverses raisons économiques, l'industrie agrochimique n'est pas très active dans la promotion de nouvelles molécules d'herbicide, comme par le passé. Le développement d'un nouveau composé et le coût de son homologation (information toxicologique détaillée avec plus d'exigences que par le passé) rendent le processus économiquement plus coûteux. Ainsi, dans les années récentes, l'amélioration de la gestion des mauvaises herbes, particulièrement dans certaines économies développées, a été essentiellement basée sur l'utilisation de nouvelles procédures intégrées, plus l'introduction de cultures transgéniques résistantes aux herbicides.

Dans les pays en développement, l'utilisation d'herbicides a augmenté dans les cultures comme le riz directement semé, le maïs, le coton et le soja, principalement en Amérique Latine et dans les pays de l'Asie, alors qu'en Afrique, l'utilisation d'herbicides est toujours très faible.

Les problèmes de résistance aux herbicides sont en augmentation dans plusieurs localités et régions du monde. Il y a un bon site Web (http://www.weedscience.org/in.asp), qui fournit des informations mises à jour des cas de résistance dans le monde entier. En plus, le problème de résistance et sa gestion sont aussi discutés dans la présente publication par Dr. Bernal Valverde.

Les informations disponibles sur les cas de résistance permettent aussi aux scientifiques de créer des matériels de prévention de résistance aux herbicides dans certaines cultures. La recherche a été aussi initiée par la FAO afin de fournir des conseils détaillés aux services de vulgarisation agricole dans les pays en développement.

UTILISATION DE CULTURES TRANSGENIQUES RESISTANTES AUX HERBICIDES (CRHs)

Au cours des huit dernières années, les cultures génétiquement améliorées avec la résistance aux herbicides de post-levée d'un large spectre d'action comme le glyphosate, ont été créées grâce au génie génétique. Ces progrès ont permis aux agriculteurs d'utiliser des herbicides

non-sélectifs appliqués sélectivement sur les cultures déjà émergées, et de mettre facilement en œuvre le zéro-labour avec la protection subséquente du sol. L'utilisation de quelques herbicides comme le glyphosate rend possible la réduction de l'utilisation d'herbicides actifs au niveau du sol et les problèmes d'effets résiduels qui leur sont associés.

Les cultures résistantes aux herbicides permettent de contrôler les mauvaises herbes de manière simple, une gestion plus efficace des mauvaises herbes problématiques et résistantes, l'usage accru du labour minimum ou du zéro labour et d'éviter les pertes de récolte causées par l'utilisation des herbicides sélectifs actuellement utilisés (FAO, 1998).

Bien que les avantages soient certains, les cultures résistantes aux herbicides (CRHs) peuvent aussi poser des risques directs à la santé humaine, et peuvent causer des risques indirects à l'écologie, et à l'évolution qui n'ont pas bénéficié de beaucoup d'attention de la part des agences de régulation (Ford Denison, 1999).

Il existe plusieurs préoccupations pour ce qui concerne les conséquences de la création et le déploiement des cultures transgéniques résistantes aux herbicides. Les objections à l'utilisation de ces cultures transgéniques reposent sur plusieurs sujets relatifs aux risques y associés (FAO, 2001), comme le potentiel de transfert des gènes des cultures résistantes aux herbicides (CRHs) aux plantes sauvages apparentées, créant ainsi de super mauvaises herbes; et la possibilité des repousses de CRHs de devenir des mauvaises herbes dans les cultures subséquentes. Ainsi, à ce niveau, les risques peuvent être variables. et parmi eux :

- difficultés dans la gestion des repousses résistantes aux herbicides;
- sélection de la flore des mauvaises herbes en faveur des espèces moins susceptibles ou celles qui ont l'aptitude d'éviter l'herbicide utilisé dans la culture résistante;
- Développement de biotypes résistants au niveau des espèces préalablement sensibles à l'herbicide;
- Dépendance accrue des agriculteurs vis à vis des herbicides;
- perte potentielle de souches locales cultivées;
- développement potentiel de résistances multiples (superposition de gènes).

Dans le souci de prévenir ces problèmes, une équipe technique de la 'Royal Veterinary and Agricultural University (KVL), Danemark, sponsorisée par la FAO a préparé l'avant projet des procédures pour l'évaluation des risques écologiques des cultures herbicide-résistantes qui étaient par la suite révisées par les commentaires et suggestions de plusieurs spécialistes du monde, et discutées et améliorées complètement à un atelier organisé par la FAO et le 'Royal Veterinary and Agricultural University (KVL), Département des Sciences Agronomiques (Malherbologie), tenu à Copenhague, Danemark, en septembre 2000. Le document final est toujours à l'ultime étape de sa préparation, et établira les méthodes d'évaluation des CRHs avant leur introduction dans les pratiques agricoles de chaque pays.

Ces procédures identifient deux scénarios: où les CRHs sont à introduire dans un système agricole où il existe des espèces de mauvaises herbes apparentées compatibles, et où les CRHs sont à introduire dans un autre système agricole où il y a un risque minimum de flux de gènes vers d'autres espèces. Cinq clés sont préparées pour cette évaluation, chacune d'elles étant compatible avec une possibilité spécifique.

Un meilleur aperçu de cette question est fourni dans ce volume par Drs. K. Madsen-Haugen et J. Streibig, du Danemark.

AGRICULTURE DE CONSERVATION

L'agriculture de conservation gagne beaucoup de reconnaissance parmi les agriculteurs du monde entier. Les cultures à grains comme le blé, l'orge, le maïs, le riz et le soja sont cultivés en quelques endroits du monde sous ce système, qui consiste à une rotation judicieuse des cultures avec un minimum ou un zéro-labour, incluant l'utilisation d'engrais verts et de plantes de couverture. Cette approche est bénéfique pour protéger efficacement et augmenter la fertilité du sol. C'est une erreur d'identifier l'agriculture de conservation à la pratique du zéro ou du labour minimum. En fait, ces procédures font partie du système, mais s'ils sont mis en œuvre dans les aires de monocultures, alors, on ne peut pas parler d'agriculture de conservation. L'utilisation de cultures herbicide-résistantes (CRHs) combinée avec l'application d'herbicides à larges spectres rend le processus d'agriculture de conservation plus facile, mais aussi elle fait courir le risque de provoquer l'émergence de nouveaux problèmes de mauvaises herbes, soit par un changement dans les populations de mauvaises herbes, soit par la présence d'espèces capables de faire évoluer la résistance aux herbicides en utilisation. Il n'est pas toujours nécessaire d'utiliser des herbicides et des CRHs, particulièrement lorsque le système a été pratiqué pendant dix ans ou plus.

Bien que ce développement soit réel, plusieurs mauvaises herbes demeurent toujours et affectent sérieusement la production d'un certain nombre de cultures comme le riz, avec l'infestation de riz nuisible/rouge, et *Echinochloa* spp.; l'adventice parasite *Orobanche* qui infecte le tournesol, le *Vicia faba* L. et les cultures Solanacées; les parasites *Striga* spp. dans les céréales en Afrique au Sud du Sahara, et *Imperata cylindrica* dans plusieurs régions d'Afrique.

Le changement en faveur du zéro-labour ou les pratiques de semis direct suscite des inquiétudes chez beaucoup de producteurs quand il s'agit de contrôler les mauvaises herbes. La perte du labour comme méthode de contrôle des mauvaises herbes signifie que les producteurs doivent ajuster les rotations des cultures, l'utilisation des herbicides et d'autres pratiques culturales en compensation. Les mauvaises herbes pérennes peuvent devenir un sérieux problème à surmonter, et il y a nécessité de mettre en œuvre des méthodes culturales supplémentaires comme l'utilisation des cultures de couverture. Quelques espèces annuelles comme l'avoine sauvage et les repousses du colza, poussent aussi bien dans des conditions de zéro-labour.

Des informations précieuses sur les méthodes culturales et préventives de contrôle des mauvaises herbes sont fournies par Dr. Paolo Barberi dans ce volume.

BIBLIOGRAPHIE

Anon. 2003. *Hydrilla verticillata* (Hydrilla). The Western Aquatic Plant Management Society. (available at http://www.wapms.org/plantes/hydrilla.html)

Balciunas, J. K., & Center, T.D. 1988. Australian insects to control Hydrilla, an update. *Proc. of the 22th Annual Aquatic Plant Control Res. Program and Operations Review*, pp.312-319. Miscellaneous Paper A-88-5. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.

Bennett, C. A. & Buckingham, G.R. 1991. Laboratory biologies of *Bagous affinis* and *B. laevigatus (Coleoptera: Curculionidae)* attacking tubers of *Hydrilla verticillata Hydocharitaceae*). *Ann. Entomol. Soc. Amer.* 84 (4): 421-428.

FAO. 1998. *Technical Meeting on benefits and risks of transgenic herbicide-resistant crops.* Rome, Italy, 16-18 November 1998, pp. 38.

FAO. 1999. Report of the global workshop on red rice control- Taller global de control de arroz rojo. 30 August - 3 September 1999, Varadero, Cuba. FAO, Rome, 158 p.

FAO. 2000. Workshop on *Echinochloa* Control, 27 May 2001, Institute of Plant Protection, Beijing, China. Available at http://www.fao.org/ag/AGp/agpp/IPM/Weeds/.

FAO. 2001. Draft guidelines for assessment of ecological hazards of herbicide- and insect – resistant crops. Plant Production and Protection Division, FAO, Rome, 18 p.

Ford Denison, R. 1999. *Ecological risks of genetically-engineered crops.* University of California, Davis. (available at http://agronomy.ucdavis.edu/ltras/doc/nbc99/tsld001.htm)

Kanampiu, F. & Friesen, D. 2002. *Striga weed control with herbicide-coated maize seed.*International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). (available at Url:http://www.cimmyt.org/Research/Maize/results/striga/control.pdf)

Labrada R. & Fornasari L. 2003. Management of problematic aquatic weeds in Africa, FAO efforts and achievements during the period of 1991-2001. FAO, Rome, 28 p.

Muniappan, R, 1994. *Chromolaena odorata.* In *Weed management for Developing Countries.* eds. Labrada, R., Caseley, J.C. & Parker, C. FAO, Plant Production and Protection Paper No. 120, Rome, pp. 93-94.

Pickett, J. A. 2000. *Striga* control by intercropping with *Desmodium* species. Haustorium,*Parasitic Plantes Newsletter,* August, No. 37.

Ransom, J. K. 1996. Integrated management of *Striga* spp. in the agriculture of sub-Saharan Africa. *Proc. of the Second Int. Weed Control Congress,* Copenhagen, 25-28 June 1996: Vol. 1-4, pp: 623-628. Brown, H., Cussans, G. W., Devine, M.D., Duke, S.O., Fernandez-Quintanilla, C., Helweg, A., Labrada, R., Landes, M., Kudsk, P. & Streibig, J. C. eds.

Rice-Wheat Consortium for the Indo-Gangetic Plains & CIMMYT. 2003. *Tillage and Crop Establishment.* (available at Url: http://www.rwc-prism.cgiar.org/rwc/tce.asp)

Timbilla J.A. 1996. Effect of biological control of *Chromolaena odorata* on biodiversity: a case study in the Ashanti region of Ghana. *Proc. of the Fourth Int. Workshop on Biological Control and Management of C. odorata,* Bangalore, India, 1996.

Tjitrosemito Soekisman. 1996. Introduction of *Procecidochares connexa (Diptera: Tephritidae*) to Java island to control *Chromolaena odorata*. *Proc. of the Fourth Int. Workshop on Biological Control and Management of C. odorata,* Bangalore, India.

Watson, A. K., Ciotola, M. & Peden, D. 1998. *A non-toxic method of controlling the noxious weed Striga, the bane of farmers in Africa's Sahel region.* International Development Research Centre. (available at Url: http://www.solutions-site.org/cat11_sol102.htm)

Wilson, C.G. & Widayanto, E. B. 1996. A technique for spreading the *Chromolaena* gall-fly *Procecidochares connexa* to remote locations. *Proc. of the Fourth Int. Workshop on Biological Control and Management of C. odorata,* Bangalore, India.

Yussefi, M. & Willer, H. 2002. *Organic agriculture worldwide, 2002. Statistics and future prospects.* Bad Dürkheim, SÖL-Sonderausgabe No. 74, 159 pp.

INDEX

INDEX

CAHIERS TECHNIQUES DE LA FAO

ÉTUDES FAO: PRODUCTION VÉGÉTALE ET PROTECTION DES PLANTES

1	Horticulture: a select bibliography, 1976 (A)
2	Cotton specialists and research institutions in selected countries, 1976 (A)
3	Légumineuses alimentaires: répartition, adaptabilité, biologie du rendement, 1980 (A E F)
4	La culture du soja sous les tropiques, 1978 (A C E F)
4 Rev.	1. Soybean production in the tropics (first revision), 1982 (A)
5	Les systèmes pastoraux sahéliens, 1977 (F)
6	Résistance aux pesticides et évaluation des pertes de récolte – 1, 1977 (A E F)
6/2	Résistance aux pesticides et évaluation des pertes de récolte – 2, 1979 (A E F)
6/3	Résistance aux pesticides et évaluation des pertes de récolte – 3, 1981 (A E F)
7	Rodent pest biology and control – Bibliography 1970-74, 1977 (A)
8	Tropical pasture seed production, 1979 (A E** F**)
9	Food legume crops: improvement and production, 1977 (A)
10	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1977 – Rapport, 1978 (A E F)
10 Rev.	Pesticide residues in food 1977 – Report, 1978 (A)
10 Sup.	Pesticide residues in food 1977 – Evaluations, 1978 (A)
11	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1965-78 (A E F) Index et résumé, 1979 (A E F)
12	Calendriers culturaux, 1978 (A/E/F)
13	L'utilisation des normes FAO pour les produits phytopharmaceutiques, 1979 (A E F)
14	Lutte intégrée contre les ennemis du riz, 1979 (A Ar C E F)
15	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1978 – Rapport, 1979 (A E F)
15 Sup.	Pesticide residues in food – Evaluations, 1979 (A)
16	Rodenticides: analyses, normes, préparations utilisées en santé publique et en agriculture, 1985 (A E F)
17	Surveillance agrométéorologique pour la prévision des récoltes, 1979 (A C E F)
18	Guidelines for integrated control of maize pests, 1979 (A C)
19	Introduction à la lutte intégrée contre les ennemis du sorgho, 1980 (A E F)
20	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1979 – Rapport, 1980 (A E F)
20 Sup.	Pesticide residues in food 1979 – Evaluations, 1980 (A)
21	Méthodes recommandées pour la mesure de la résistance des ravageurs aux pesticides, 1981 (A F)
22	China: multiple cropping and related crop production technology, 1980 (A)
23	China: development of olive production, 1980 (A)
24/1	Amélioration et production du maïs, du sorgho et du millet – Vol. 1. Principes généraux, 1986 (A F)
24/2	Amélioration et production du maïs, du sorgho et du mil – Vol. 2. Sélection, agronomie et production des semences, 1987 (A F)
25	*Prosopis tamarugo*: arbuste fourrager pour zones arides, 1981 (A E F)
26	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1980 – Rapport, 1981 (A E F)
26 Sup.	Pesticide residues in food 1980 – Evaluations, 1981 (A)
27	Small-scale cash crop farming in South Asia, 1981 (A)
28	Deuxième consultation d'experts sur les critères écotoxicologiques applicables à l'homologation des pesticides, 1982 (A E F)
29	Sesame: status and improvement, 1981 (A)
30	Palm tissue culture, 1981 (A C)
31	An eco-climatic classification of intertropical Africa, 1981 (A)
32	1. Weeds in tropical crops: selected abstracts, 1981 (A)
32 Sup.	Weeds in tropical crops: review of abstracts, 1982 (A)
33	Plant collecting and herbarium development, 1981 (A)
34	Improvement of nutritional quality of food crops, 1981 (A C)
35	Date production and protection, 1982 (A)
36	El cultivo y la utilización del tarwi *Lupinus mutabilis* Sweet, 1982 (E)
37	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1981 – Rapport, 1982 (A E F)
38	Winged bean production in the tropics, 1982 (A)
39	Semences, 1982 (A/E/F)
40	Lutte contre les rongeurs en milieu agricole, 1985 (A Ar C E F)
41	Rice development and rainfed rice production, 1982 (A)
42	Pesticide residues in food 1981 – Evaluations, 1982 (A)
43	Manuel sur la culture des champignons, 1986 (A F)
44	Lutte raisonnée contre les mauvaises herbes: méthodes améliorées, 1986 (A E F)
45	Pocket computers in agrometeorology, 1983 (A)
46	Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1982 – Rapport, 1983 (A E F)
47	Le sagoutier, 1985 (A F)
48	Directives pour la lutte intégrée contre les ennemis du cotonnier, 1986 (A Ar E F)
49	Pesticide residues in food 1982 – Evaluations, 1983 (A)
50	International plant quarantine treatment manual, 1983 (A C)
51	Handbook on jute, 1983 (A)
52	The palmyrah palm: potential and perspectives, 1983 (A)
53/1	Selected medicinal plants, 1983 (A)
54	La fumigation en tant que traitement insecticide, 1990 (A C E F)

55 Breeding for durable disease and pest resistance, 1984 (A C)
56 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1983 – Rapport, 1984 (A E F)
57 Coconut, tree of life, 1984 (A E)
58 Directives économiques pour la lutte contre les ennemis des cultures, 1985 (A E F)
59 Micropropagation of selected rootcrops, palms, citrus and ornamental species, 1984 (A)
60 Equipement pour la réception et la conservation de tissus végétaux destinés à la multiplication *in vitro*, 1985 (A E F)
61 Pesticide residues in food 1983 – Evaluations, 1985 (A)
62 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1984 – Rapport, 1985 (A E F)
63 Manual of pest control for food security reserve grain stocks, 1985 (A C)
64 Contribution à l'écologie des aphides africains, 1985 (F)
65 Amélioration de la culture irriguée du riz des petits fermiers, 1985 (F)
66 Sesame and safflower: status and potentials, 1985 (A)
67 Pesticide residues in food 1984 – Evaluations, 1985 (A)
68 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1985 – Rapport, 1986 (A E F)
69 Breeding for horizontal resistance to wheat diseases, 1986 (A)
70 Breeding for durable resistance in perennial crops, 1986 (A)
71 Technical guideline on seed potato micropropagation and multiplication, 1986 (A)
72/1 Pesticide residues in food 1985 – Evaluations – Part I: Residues, 1986 (A)
72/2 Pesticide residues in food 1985 – Evaluations – Part II: Toxicology, 1986 (A)
73 Suivi agrométéorologique des cultures et prévision des rendements, 1987 (A E F)
74 Ecology and control of perennial weeds in Latin America, 1986 (A E)
75 Guide technique des essais variétaux en plein champ, 1995 (A E F)
76 Guidelines for seed exchange and plant introduction in tropical crops, 1986 (A)
77 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1986 – Rapport, 1987 (A E F)
78 Pesticide residues in food 1986 – Evaluations – Part I: Residues, 1986 (A)
78/2 Pesticide residues in food 1986 – Evaluations – Part II: Toxicology, 1987 (A)
79 Tissue culture of selected tropical fruit plants, 1987 (A)
80 Improved weed management in the Near East, 1987 (A)
81 Weed science and weed control in Southeast Asia, 1987 (A)
82 Hybrid seed production of selected cereal, oil and vegetable crops, 1987 (A)
83 Litchi cultivation, 1989 (A E)
84 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1987 – Rapport, 1988 (A E F)
85 Manuel d'élaboration et d'utilisation des normes FAO pour les produits phytopharmaceutiques, 1988 (A E F)
86/1 Pesticide residues in food 1987 – Evaluations – Part I: Residues, 1988 (A)
86/2 Pesticide residues in food 1987 – Evaluations – Part II: Toxicology, 1988 (A)
87 Root and tuber crops, plantains and bananas in developing countries – challenges and opportunities, 1988 (A)
88 *Jessenia* and *Oenocarpus*: neotropical oil palms worthy of domestication, 1988 (A E)
89 Production de légumes dans les conditions arides et semi-arides d'Afrique tropicale, 1988 (A F)
90 Cultures protégées en climat méditerranéen, 1988 (A E F)
91 Pastures and cattle under coconuts, 1988 (A E)
92 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1988 – Rapport, 1988 (A E F)
93/1 Pesticide residues in food 1988 – Evaluations – Part I: Residues, 1988 (A)
93/2 Pesticide residues in food 1988 – Evaluations – Part II: Toxicology, 1989 (A)
94 Utilization of genetic resources: suitable approaches, agronomical evaluation and use, 1989 (A)
95 Rodent pests and their control in the Near East, 1989 (A)
96 *Striga* – Improved management in Africa, 1989 (A)
97/1 Des fourrages pour le Proche-Orient: la luzerne, 1993 (A Ar F)
97/2 Fourrages pour le Proche-Orient: les pâturages de luzerne annuelle, 1990 (A Ar F)
98 An annotated bibliography on rodent research in Latin America 1960-1985, 1989 (A)
99 Résidus des pesticides dans les produits alimentaires 1989 – Rapport, 1989 (A E F)
100 Pesticide residues in food 1989 – Evaluations – Part I: Residues, 1990 (A)
100/2 Pesticide residues in food 1989 – Evaluations – Part II: Toxicology, 1990 (A)
101 Soilless culture for horticultural crop production, 1990 (A)
102 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires, 1990 – Rapport, 1991 (A E F)
103/1 Pesticide residues in food 1990 – Evaluations – Part I: Residues, 1990 (A)
104 Major weeds of the Near East, 1991 (A)
105 Fondements théoriques et pratiques de la culture des tissus végétaux, 1992 (E F)
106 Technical guidelines for mushroom growing in the tropics, 1990 (A)
107 *Gynandropsis gynandra* (L.) Briq. – a tropical leafy vegetable – its cultivation and utilization, 1991 (A)
108 Carambola cultivation, 1993 (A E)
109 Soil solarization, 1991 (A)
110 Potato production and consumption in developing countries, 1991 (A)
111 Pesticide residues in food 1991 – Report, 1991 (A)
112 Cocoa pest and disease management in South-East Asia and Australasia, 1992 (A)
113/1 Pesticide residues in food 1991 – Evaluations – Part I: Residues, 1991 (A)

114 Integrated pest management for protected vegetable cultivation in the Near East , 1992 (A)
115 Olive pests and their control in the Near East, 1992 (A)
116 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1992 – Rapport 1992, 1993 (A F E)
117 Semences de qualité déclarée, 1995 (A F E)
118 Pesticide residues in food 1992 - Evaluations - Part I: Residues, 1993 (A)
119 Quarantine for seed, 1993 (A)
120 Gestion des mauvaises herbes pour les pays en développement, 1993 (A F E)
120/1 Gestion des mauvaises herbes pour les pays en développement, Addendum 1, 2005 (A F E)
121 Rambutan cutivation, 1993 (A)
122 Résidus de pesticides dans les produits alimentaires 1993 – Rapport 1993, 1994 (A F E)
123 Rodent pest management in eastern Africa, 1994 (A)
124 Pesticide residues in food 1993 – Evaluations – Part I: Residues, 1994 (A)
125 Plant quarantine: theory and practice, 1994 (Ar)
126 Tropical root and tuber crops – Production, perspectives and future prospects, 1994 (A)
127 Pesticide residues in food 1994 – Report, 1994 (A)
128 Manuel d'élaboration et d'utilisation des normes FAO pour les produits phytopharmaceutiques – quatrième édition, 1997 (A F E)
Fourth edition, 1995 (A F E)
129 Mangosteen cultivation, 1995 (A)
130 Post-harvest deterioration of cassava – A biotechnology perspectives, 1995 (A)
131/1 Pesticide residues in food 1994 – Evaluations – Part I: Residues, Volume 1, 1995 (A)
131/2 Pesticide residues in food 1994 – Evaluations – Part I: Residues, Volume 2, 1995 (A)
132 Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear, 1995 (A)
133 Pesticide residues in food 1995 – Report, 1996 (A)
134 Number not assigned
135 Citrus pest problems and their control in the Near East, 1996 (A)
136 El pepino dulce y su cultivo, 1996 (E)
137 Pesticide residues in food 1995 – Evaluations – Part I: Residues, 1996 (A)
138 Sunn pests and their control in the Near East, 1996 (A)
139 Weed management in rice, 1996 (A)
140 Pesticide residues in food 1996 – Report, 1996 (A)
141 Cotton pests and their control in the Near East, 1997 (A)
142 Pesticide residues in food 1996 – Evaluations – Part I: Residues, 1997 (A)
143 Management of the whitefly-virus complex, 1997 (A)
143 Management of the whitefly-virus complex, 1997 (A)
144 plant nematode problems and their control in the Near East region, 1997 (A)
145 Pesticide residues in food 1997 – Report, 1998 (E)
146 Pesticide residues in food 1997 – Evaluations – Part I: Residues, 1998 (A)
147 Soil solarization and integrated management of soilborne pests, 1998 (A)
148 Pesticide residues in food 1998 – Report, 1999 (A)
149 Manual on the development and use of FAO specifications for plant protection products – Fifth edition, including the new procedure, 1999 (A)
150 Restoring farmers' seed systems in disaster situations, 1999 (A)
151 Politiques et programmes semenciers pour l'Afrique subsaharienne, 1999 (A F)
152/1 Pesticide residues in food 1998 – Evaluations – Part I: Residues, Volume 1 (A)
152/2 Pesticide residues in food 1998 – Evaluations – Part I: Residues, Volume 2 (A)
153 Pesticide residues in food 1999 – Report, 1999 (A)
154 Greenhouses and shelter structures for tropical regions, 1999 (A)
155 Vegetable seedling production manual, 1999 (A)
156 Date palm cultivation, 1999 (A)
156 Rev.1 Date palm cultivation, 2002 (A)
157 Pesticide residues in food 1999 – Evaluations – Part I: Residues (A)
158 Ornamental plant propagation in the tropics, 2000 (A)
159 Seed policy and programmes in the Near East and North Africa, 2000 (A)
160 Seed policy and programmes for Asia and the Pacific, 2000 (A)
161 Silage making in the tropics with particular emphasis on smallholders, 2001 (A E)
162 Grassland resource assessment for pastoral systems, 2001, (A)
163 Pesticide residues in food 2000 – Report, 2001 (A)
164 Políticas y programas de semillas en América latina y el Caribe, 2001 (A E)
165 Pesticide residues in food 2000 – Evaluations – Part I, 2001 (A)
166 Global report on validated alternatives to the use of methyl bromide for soil fumigation, 2001 (A)
167 Pesticide residues in food 2001 - Report, 2001 (A)
168 Seed policy and programmes for the Central and Eastern European countries, Commonwealth of Independent States and other countries in transition, 2001 (A)
169 Cactos (*Opuntia* spp.) as forage, 2003 (A E)
170 Submission and evaluation of pesticide residues data for the estimation of maximum residue levels in food and feed, 2002 (A)
171 Pesticide residues in food 2001 – Evaluations – Part I, 2002 (A)
172 Pesticides residues in food, 2002 – Report, 2002 (A)
173 Manual on development and use of FAO and WHO specifications for pesticides, 2002 (A E)
174 Genotype x environment interaction – Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations, 2002 (A)
175/1 Pesticide residues in food 2002 – Evaluations – Part 1: Residues – Volume 1 (A)
175/2 Pesticide residues in food 2002 – Evaluations – Part 1: Residues – Volume 2 (A)
176 Pesticide residues in food 2003 – Report, 2003 (A)
177 Pesticide residues in food 2003 – Evaluations – Part 1: Residues, 2004 (A)
178 Pesticide residues in food 2004 – Report, 2004 (A)

179 Triticale improvement and production, 2004 (A)
180 Seed multiplication by resource limited farmers – Proceedings of the Latin American workshop, 2004 (A)
181 Towards effective and sustainable seed-relief activities, 2004 (A)
182/1 Pesticide residues in food 2004 – Evaluations – Part 1: Residues, Volume 1 (A)
182/2 Pesticide residues in food 2004 – Evaluations – Part 1: Residues, Volume 2 (A)
183 Pesticide residues in food 2005 – Report, 2005 (A)

Disponibilité: décembre 2005

A	– Anglais	Multil. –	Multilingue
Ar	– Arabe	*	Epuisé
C	– Chinois	**	En préparation
E	– Espagnol		
F	– Français		
P	– Portugais		

On peut se procurer les Cahiers techniques de la FAO auprès des points de vente des publications de la FAO, ou en s'adressant directement au Groupe des ventes et de la commercialisation, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie.

En 1994, la FAO publiait Gestion des mauvaises herbes pour les pays en développement, afin de divulguer les informations les plus importantes concernant la gestion des mauvaises herbes. Le présent ouvrage présente la mise à jour de ces informations et les nouveaux développements en la matière. Il se compose de trois chapitres contenant de précieuses indications concernant la bioécologie des mauvaises herbes, les adventices à problèmes et le détail de différentes stratégies de lutte. La gestion des mauvaises herbes doit répondre aux problèmes spécifiques d'un terrain donné; par conséquent, des connaissances de base en bioécologie sont nécessaires pour gérer correctement une infestation. Le premier chapitre décrit le protocole d'évaluation de la banque des semences des mauvaises herbes et illustre les fondements de la compétition des mauvaises herbes. Il introduit aussi le sujet de l'évaluation des risques dérivés des mauvaises herbes et fournit des directives aux pays pour renforcer leurs protocoles de quarantaine. Le deuxième chapitre couvre certains aspects relatifs à des mauvaises herbes posant problèmes dans différents domaines, y compris la jacinthe d'eau. Le chapitre final est consacré à la présentation/discussion des différentes stratégies de lutte pour une gestion améliorée des mauvaises herbes. Bien qu'aucune information ne soit fournie concernant les molécules des nouveaux herbicides, la résistance des herbicides et la manière de la gérer, ainsi que les risques et avantages des cultures transgéniques résistantes aux herbicides sont des sujets bien traités.

